

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

ÚSTAV SOUDNÍHO INŽENÝRSTVÍ

INSTITUTE OF FORENSIC ENGINEERING

ODBOR ZNALECTVÍ VE STROJÍRENSTVÍ, ANALÝZA DOPRAVNÍCH NEHOD A OCEŇOVÁNÍ MOTOROVÝCH VOZIDEL

DEPARTMENT OF EXPERTISE IN MECHANICAL ENGINEERING, ANALYSIS OF TRAFFIC ACCIDENTS AND
VEHICLE ASSESSMENT

IDENTIFIKACE RELEVANTNÍCH STOP PNEUMATIK NA MÍSTĚ DOPRAVNÍ NEHODY NA ZÁKLADĚ JEJICH FYZIKÁLNÍCH VLASTNOSTÍ

IDENTIFICATION OF RELEVANT TIRE TRACES IN TRAFFIC ACCIDENT PLACE BASED ON THEIR
PHYSICAL CHARACTERISTICS

DIZERTAČNÍ PRÁCE

DOCTORAL THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Ing. et Ing. Bc. Martin Bilík

ŠKOLITEL

SUPERVISOR

Ing. Albert Bradáč, Ph.D.

BRNO 2018

Zadání dizertační práce

Student: **Ing. et Ing. Martin Bilík**
Studijní program: Soudní inženýrství
Studijní obor: Soudní inženýrství
Vedoucí práce: **Ing. Albert Bradáč, Ph.D.**
Akademický rok: 2017/18
Ústav/odbor: Odbor znalectví ve strojírenství, analýza dopravních nehod a oceňování motorových vozidel

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č. 111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma dizertační práce:

Identifikace relevantních stop pneumatik na místě dopravní nehody na základě jejich fyzikálních vlastností

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

U vozidel, které nebyla vybavena systémy typu ABS, bylo možno řadu důležitých informací pro analýzu průběhu dopravních nehod získávat ze stop, které pneumatiky při skluzu zanechávaly na vozovce. Tyto stopy byly vizuálně zjištěitelné a bylo možné je dokumentovat i pomocí běžných fotografických přístrojů. U moderních vozidel, která jsou od roku 2006 povinně vybavena systémy ABS je vyšší účinnosti brzdění dosahováno regulací otáček kol vozidla na úrovni 20-30% skluzu, při kterém již stopy zanechané pneumatikami vozidla nejsou vizuálně zřetelné a je potřebné se tak zabývat možnostmi jejich zjištění a dokumentace pomocí jiných metod.

Úkolem studenta tak je:

- Na základě analýzy složení směsí používaných pro výrobu pneumatik vytipovat prvky, které je možné detekovat a který se nachází ve směsi v dostatečném množství.
- Experimentálně ověřit vybrané metody pro detekci tohoto prvku i pro detekci stopy pneumatiky jako takové.
- Vyhodnotit výsledky provedených měření.
- Učinit závěry ohledně vhodnosti testovaných metod a doporučení pro další případné zkoumání.

Cíle dizertační práce:

Cílem dizertační práce je nalézt takové prvky (ev. sloučeniny), které se v dostatečné míře nachází ve směsích běhounů běžně vyráběných pneumatik a i při nízkém skluzu pneumatik v měřitelném množství ulpívají na vozovce. Na základě známých či nových fyzikálních či chemických metod vyvinout (navrhnout) nové metody a postupy, které by bylo možné použít pro detekci nezřetelných stop pneumatik na vozovce pro potřeby řešení DN.

Seznam literatury:

BRADÁČ, A.: Soudní inženýrství. Brno: CERM, 1999. ISBN 80-720-4133-9

BURG, Heinz a Andreas MOSER. Handbuch Verkehrsunfallrekonstruktion: Unfallaufnahme, Fahrdynamik, Simulation. 2., aktualisierte Aufl. Wiesbaden: Vieweg+Teubner, 2009

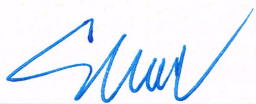
DOLEŽEL, J., NOVÁK Č., VOLF Z.: Kriminalistické minimum, 1. vyd., Praha : Ministerstvo vnitra ČR, 1998

CHMELÍK J. a kol.: Dopravní nehody. Plzeň: Nakladatelství Aleš Čeněk, s.r.o., 2009. 540 s., ISBN 978-80-7380-211-0.

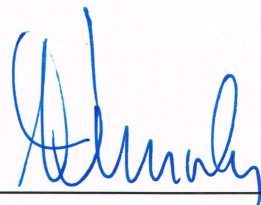
CHMELÍK J.: Vyšetřování silničních dopravních nehod

Termín odevzdání dizertační práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2017/18.

V Brně, dne 6. 6. 2018



Ing. Bc. Marek Semela, Ph.D.
vedoucí odboru



doc. Ing. Aleš Vémola, Ph.D.
ředitel

Abstrakt

Práce se zabývá možnostmi identifikace relevantních stop pneumatik na místě dopravní nehody na základě jejich fyzikálních vlastností. Stopy pneumatik na vozovce jsou jedním z nejdůležitějších objektivních prvků pro analýzu nehodového děje a jejich snadná a přesná detekce je tedy velmi důležitá. S narůstající technickou vybaveností vozidel, zejména se zavedením novějších generací asistenčních systémů brzdění, se brzdné stopy na vozovce zanechané pneumatikami stávají pro lidské oko téměř neviditelné. Je tedy žádoucí, aby jejich detekce byla nejen co nejpřesnější, ale také pokud možno snadná a rychlá, a to nejen pro soudní znalce, ale především pro příslušníky výjezdových jednotek dopravní policie.

V souladu s vývojem a zaváděním nových bezpečnostních a asistenčních systémů do vozidel by měl být i vývoj prostředků a metod zajištění podkladů pro technickou analýzu dopravních nehod. Realita však ukazuje, že postupy, byť stále funkční, jsou několik desítek let prakticky shodné, a především jsou závislé na subjektivních schopnostech dokumentujících osob. Zásadním prvkem práce, ve srovnání s dříve popsányými postupy měření, je využití moderních metod a zařízení, tj. poznatků na nejvyšší známé úrovni poznání. Cílem je nalezení a ověření jednoduché, přesné a subjektivně co nejméně ovlivnitelné metody detekce stop na vozovce.

Pomocí série provedených měření byla potvrzena možnost využití termokamery, v technické úrovni, kterou obvykle disponují jednotky hasičského záchranného sboru na místě dopravní nehody, za omezených atmosférických a časových podmínek. Dále bylo využito spektroskopie laserem buzeného plazmatu přístrojem rLIBS. Tuto metodu detekce nezřetelných stop pneumatik lze, na základě provedených měření a uvažovaného odstranění nedostatků přístroje ve vývojové fázi prototypu, označit jako minimálně ovlivnitelnou dokumentující osobou a současně dostatečně rychlou.

Abstract

The thesis deals with the possibilities of identifying the relevant tire traces at the place of a traffic accident based on their physical characteristics. Braking traces on the road are one of the most important objective elements for accident analysis, their easy and accurate detection is very important for accurate accident assessment. With the increasing technical equipment of vehicles, especially with the introduction of newer generations of braking assistance systems, traces left by the tires become almost invisible to the human eye. It is therefore highly desirable that their

detection should be not only as accurate as possible but also as easy and fast as possible, not only for forensic experts, but especially for members of the traffic police departments.

In line with the development and introduction of new safety and assistance systems for vehicles should also be the development of means and methods of providing the basis for technical analysis of traffic accidents. Reality shows that the procedures, even if still functional, are practically identical for several decades, are dependent on the subjective capabilities of the documenting person. An essential element of the work, compared to the previously described measurement procedures, is the use of modern methods and devices at the highest known level of knowledge. The aim is to find and verify a simple, accurate, subjectively least influenced detecting method for tire traces on the road.

A series of measurements confirmed the possibility of using the thermal camera at the technical level usually available at the place of the accident, under limited atmospheric and time conditions. In addition, laser-induced plasma spectroscopy and rLIBS were used. This method of detecting spotless tire treads can be marked as a minimally feasible documentary and at the same time as fast enough, based on the measurements made and the intended removal of defects of the instrument in the development phase of the prototype.

Klíčová slova

Vozidlo, brzdná stopa, brzdění, LIBS, pneumatika, silnice.

Keywords

Vehicle, braking trace, braking, LIBS, tire, road.

Bibliografická citace

BILÍK, M. *Identifikace relevantních stop pneumatik na místě dopravní nehody na základě jejich fyzikálních vlastností*. Brno: Vysoké učení technické v Brně. Ústav soudního inženýrství, 2018. 115 s.
Vedoucí dizertační práce Ing. Albert Bradáč, Ph.D.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem dizertační práci na téma *Identifikace relevantních stop pneumatik na místě dopravní nehody na základě jejich fyzikálních vlastností* zpracoval samostatně a že jsem uvedl všechny použité informační zdroje.

V Brně dne

.....

Ing. et Ing. Bc. Martin Bílík

Poděkování

Děkuji vedoucímu mé dizertační práce Ing. Albertu Bradáčovi, Ph.D. za odborné vedení, cenné rady připomínky a konzultace v průběhu celého studia. Za pomoc při realizaci měření a zpracování dat děkuji Ing. Davidu Prochazkovi, Ph.D. Dále děkuji kolegům z odboru Analýzy silničních nehod za poskytnutí testovacích vozidel a za spolupráci při měřeních, zejména Ing. Markovi Semelovi, Ph.D. a Ing. Michalu Belákovi. Poděkování patří rovněž společnosti TSI System za zapůjčení termokamery a společnosti Škoda Auto a.s. za poskytnutí testovacích vozidel.

Největší dík patří celé mé rodině za jejich nekončící podporu při studiích především manželce Soňce za bezměrnou trpělivost v celém průběhu psaní této práce.

OBSAH

OBSAH.....	11
1 ÚVOD	13
1.1 Stopy pneumatik a analýza dopravní nehody	14
1.2 Vymezení problému a problémové situace	15
2 SOUČASNÝ STAV	17
2.1 Kategorizace stop na místě dopravní nehody	17
2.2 Stopy vozidel na vozovce	20
2.2.1 Jízdní stopy	21
2.2.2 Brzdné stopy	21
2.2.3 Blokovací stopy	22
2.2.4 Smykové stopy	23
2.2.5 Akcelerační stopy	23
2.2.6 Dřecí a rycí stopy	24
2.3 Stopy pneumatik vozidel s brzdovými a bezpečnostními systémy	25
2.4 Průběh brzdění vozidla a vznik brzdných stop na vozovce	26
2.5 Vývoj asistenčních systémů s vlivem na brzdné stopy vozidel	29
2.5.1 ABS 2S	30
2.5.2 ABS 5.0	31
2.5.3 ABS 5.3	31
2.5.4 ABS 8.0	32
2.5.5 Vývoj ABS jako součásti dalších asistenčních systémů	32
2.6 Současné metody záznamu stop na místě DN	35
2.6.1 Rozpoznání stop	35
2.6.2 Metody dokumentace používané policií ČR	35
2.6.3 Využití 3D skenerů a dronů	42
2.7 Experimentální metody detekce nezřetelných stop pneumatik	45
2.7.1 Použití termokamery	45
2.7.2 Identifikace pneumatik s využitím pyrolýzy	47
2.8 Konstrukce pneumatik	50
2.8.1 Složení gumárenských směsí	52
2.8.2 Chemické složení běhounů pneumatik	55
2.9 Degradace stop pneumatik na vozovce	57
3 CÍLE PRÁCE	59

4	METODY VÝZKUMU	60
4.1.1	Využití termokamery	60
4.1.2	Využití LIBS.....	61
5	POPIS POUŽITÉHO VYBAVENÍ	63
5.1	Měřicí přístroje	63
5.2	Vozidla a pneumatiky	66
5.3	Povrchy	67
6	DETEKCE STOP S VYUŽITÍM TERMOKAMERY	68
6.1	Zvýraznění opticky nevýrazných stop	69
6.2	Znevýraznění opticky zřetelných stop.....	73
6.3	Detekce konečné polohy vozidla po odstavení.....	74
6.4	Shrnutí dosažených výsledků	76
7	DETEKCE STOP POMOCÍ RLBS.....	77
7.1	Detekce stop na betonovém povrchu	80
7.2	Detekce stop na méně používaném asfaltovém povrchu	82
7.2.1	Degradace stopy - pozvolná	85
7.2.2	Degradace stopy - zvýšená.....	89
7.3	Detekce stop na novém povrchu	94
7.3.1	Degradace stopy - pozvolná	95
7.4	Detekce stop na frekventovaném povrchu	99
7.4.1	Degradace stopy - pozvolná	101
7.5	Shrnutí dosažených výsledků a očekávaný další vývoj	104
8	ZÁVĚR	107
8.1	Využitelnost termokamer pro detekci nezřetelných stop	107
8.2	Využitelnost LIBS pro detekci nezřetelných stop.....	108
9	SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	109

1 ÚVOD

Tato dizertační práce se zabývá možnostmi identifikace relevantních stop pneumatik na místě dopravní nehody na základě jejich fyzikálních vlastností. Zásadní změnou, ke které práce směřuje ve srovnání s dříve popsány postupy měření, je využití moderních metod a zařízení, tj. poznatků na nejvyšší známé úrovni poznání.

Dle policejních statistik¹ bylo v České republice v roce 2017 Policií ČR řešeno 103 821 dopravních nehod, během kterých bylo usmrceno 502 osob, 2 339 osob se zranilo těžce a 24 740 osob se při dopravních nehodách zranilo lehce. Celková odhadnutá hmotná škoda na místech dopravních nehod byla 6,32 *miliardy* Kč. Přestože dle statistik klesá počet usmrcených osob, tak celkový počet dopravních nehod od roku 2009 každoročně o několik procent roste, s čímž je spojeno i navyšování hmotné škody, která při dopravních nehodách vzniká. Přesné stanovení příčiny vzniku dopravní nehody je potřebné nejen z hlediska určení viníka předmětné dopravní nehody, ale také z hlediska prevence vzniku nehod obecně. Díky známým příčinám je pak možné snižovat počet nehod působením vhodných technických, právních a jiných prostředků na systém dopravní prostředek – řidič – dopravní prostředí.

Z pohledu konstrukce vozidel je výsledkem analýzy příčin dopravních nehod zavádění různých bezpečnostních prvků a systémů, působících na zvýšení bezpečnosti a řiditelnosti vozidla. Z pohledu dopravní infrastruktury je výsledkem analýzy příčin dopravních nehod nejčastěji umístování dopravního značení regulujícího dopravní prostředí či úpravy stavebně technického charakteru, z hlediska vývoje to jsou pak nové materiály pro konstrukci vozovek. V neposlední řadě může vést analýza příčin dopravních nehod i ke změně právních předpisů. Zavádění nových asistenčních a bezpečnostních systémů do vozidel má však i „negativní“ stránku, kterou je snižování množství stop pneumatik na vozovce na místě dopravní nehody, přitom tyto stopy jsou jedním z primárních podkladů pro analýzu dopravní nehody.

V souladu s vývojem a zaváděním nových bezpečnostních a asistenčních systémů do vozidel by tak měl postupovat i vývoj prostředků a metod zajištění podkladů pro technickou analýzu dopravních nehod. Obecně nejznámějším příkladem zavádění nových bezpečnostních systémů je zavedení systému ABS (z anglického Anti-lock Brake System), jehož úkolem je zamezení úplné blokace brzděného kola, čímž ale dochází k omezenému vzniku brzdových stop na vozovce,

¹ Policie ČR: Informace o nehodovosti na pozemních komunikacích v ČR v roce 2017, [online], [cit. 11.01.2018]

kteřé jsou obvykle v případě zablokovaného kola velmi zřetelné a jasně rozpoznatelné. Stopy pneumatik (a stopy obecně) jsou jedním z nejdůležitějších podkladů pro analýzu předmětné dopravní nehody, je tedy maximálně žádoucí, aby jejich detekce byla nejen co nejpřesnější, ale také pokud možno snadná a rychlá, a to nejen pro soudní znalce, ale především pro příslušníky výjezdových jednotek dopravní policie. Přestože vývoj v oblasti bezpečnostních a asistenčních systémů je značný, z pohledu metod dokumentace míst dopravních nehod tomu tak není. Postupy, které v současné době používá Policie ČR pro dokumentaci míst dopravních nehod, byť stále funkční, jsou několik desítek let prakticky shodné, a především jsou závislé na subjektivních schopnostech příslušníků. Cílem je nalezení a ověření jednoduché, přesné, subjektivně co nejméně ovlivnitelné metody záznamu stop na vozovce za jakýchkoliv světelných podmínek.

1.1 STOPY PNEUMATIK A ANALÝZA DOPRAVNÍ NEHODY

Stopy na místě dopravní nehody nemusí být jen stopy jízdní, brzdné či smykové, z pohledu kriminalistiky je „stopa“ velmi široký pojem. V rámci tématu této práce budou zkoumány možnosti detekce jízdních a brzdných stop pneumatik na vozovce. Tyto stopy jsou zásadním podkladem pro technickou analýzu nehodového děje, tj. jak pohybu vozidel po střetu, tak především před střetem. Na základě znalosti jejich typu, tvaru a rozměrů pak může odborník na analýzu dopravních nehod stanovit průběh celého nehodového děje a zodpovědět zadavatelem položené otázky. Prakticky u všech dopravních nehod řešených soudními znalci jsou položeny či v rámci obecnějších otázek řešeny následující otázky:

Kde došlo ke střetu? Polohu místa střetu je možné poměrně přesně stanovit na základě geometrie stop, například podle pozice zalomení stop. Přesné určení místa střetu je důležité zejména v případech, kdy je nutné posoudit, který z účastníků dopravní nehody se nacházel v okamžiku střetu v protisměrném jízdním pruhu, či zda již vjel do koridoru pohybu dalšího účastníka.

Jaká byla střetová rychlost vozidla? Tuto otázku je nutné zodpovědět v drtivé většině technických analýz dopravních nehod. Brzdné a smykové stopy vozidel od místa střetu do konečných poloh vozidel po dopravní nehodě jsou zcela zásadní pro nalezení odpovědi na tuto otázku. Ze zadokumentované délky těchto stop je možné na základě znalosti adhezních podmínek poměrně přesně stanovit postřetovou rychlost vozidel, která je základem pro stanovení rychlosti střetové. Z tvaru a typu stop je pak možné určit způsob pohybu vozidla, případně reakci řidiče na vzniklou situaci. Lze tedy konstatovat, že platí přímá úměra mezi přesností dokumentace stop a přesností následně vypočítaných rychlostí.

Jaká byla výchozí rychlost vozidla? Tato otázka je prakticky automaticky pokládána s otázkou předchozí. Pro její zodpovězení je z technického hlediska nutné mít co nejpřesněji zadokumentované stopy pneumatik před střetem vozidel. Obvykle se jedná opět o stopy brzdné a smykové, z jejichž délky je při znalosti adhezních podmínek možné vypočítat či simulovat výchozí rychlost vozidla na začátku nehodového děje.

Reagoval řidič na vzniklou situaci, případně kdy a jakým způsobem? Z pohledu zanechaných stop pneumatik na vozovce je možné tuto otázku zodpovědět za předpokladu, že bude možné posoudit typ a geometrii zanechaných stop. Z geometrie zanechaných stop na vozovce lze usuzovat na průběh rotace vozidla během nehodového děje nebo skutečnosti, zda bylo vozidlo při nehodovém ději řidičem intenzivně brzděno, nebo jestli správně fungovaly asistenční systémy vozidla. Znalost počátku brzdné stopy je pak přímým technickým podkladem ke stanovení polohy vozidla při reakci řidiče na daný podnět. Nepřesné určení polohy reakce řidiče pak vnáší nepřesnost do simulovaných variant možností odvrácení střetu řidiči.

Jak z výše uvedeného vyplývá, kvalita dokumentace zanechaných jízdních, brzdných či smykových stop vozidel na vozovce na místě dopravní nehody přímo ovlivňuje věrohodnost a spolehlivost závěrů, ke kterým může znalec dospět při analýze předmětného nehodového děje. Z hlediska stanovení průběhu předmětné dopravní nehody mají zadokumentované stopy nezastupitelnou roli. Zpřesnění a zkvalitnění uvedených základních vstupních podkladů pak dává možnost znalci při analýze dopravní nehody rekonstruovat téměř věrně reálný průběh nehodového děje. Proto je zapotřebí detekovat i stopy, které jsou lidským okem obvykle nerozlišitelné, alespoň částečná detekce „neviditelných“ stop v místě dopravní nehody by byla významným přínosem pro analýzu dopravních nehod.

1.2 VYMEZENÍ PROBLÉMU A PROBLÉMOVÉ SITUACE

Ve své knize prof. Janíček² formuluje problémovou situaci jako nestandardní situaci vyžadující řešení ať už z objektivních či subjektivních důvodů. Od standardní situace se problémová situace liší tím, že problémová situace směřuje na řešení problémů, přičemž proces řešení není rutinní. Z tohoto důvodu musí řešitel problémové situace využívat informační, hodnotící, rozhodovací a tvůrčí činnosti a s jejich využitím hledat odpovídající metody řešení této nestandardní situace. Řešení problémové situace souvisí primárně se stanovením množiny problémů, kterou tvoří výroky spojené s řešením problémové situace a jejich následným řešením.

² JANÍČEK, P.: Systémová metodologie: Brána do řešení problémů. Vyd. 1.

V případě této dizertační práce lze jako problémovou situaci vymezit dopravní nehodu, jejíž příčiny vzniku je nutné analyzovat z různých důvodů, např. pro účely trestního řízení a posouzení odpovědnosti za vznik nehody, ale u které na místě jejího vzniku absentují stopy intenzivního brzdění, přestože by je bylo možné na daném místě očekávat. Absence opticky zřetelných stop na místě dopravní nehody, resp. nutnost exaktního řešení dopravních nehod, při kterých vozidla vybavená moderními bezpečnostními systémy nezanechávají na vozovce opticky jasně zřetelné a detekovatelné stopy pneumatik, pak má zásadní vliv na možnosti objektivního posouzení skutečného průběhu analyzované dopravní nehody.

Problémem podle prof. Janíčka³ je možné označit situaci nebo stav objektu, který není možné vyřešit rutinními činnostmi, pro jeho řešení je vyžadováno uskutečnění tvůrčích, hodnotících, rozhodovacích, informačních a výkonných činností řešitele pro nalezení vhodných metod řešení. Primárním problémem při analýze pohybu vozidel s moderními bezpečnostními systémy je nutnost posouzení, zda předmětné vozidlo i přes absenci viditelných brzdných stop brzdilo, či nikoliv. Skutečností je, že moderní vozidla při svém pohybu, konkrétně brzdění, nezanechávají na první pohled opticky jasně zřetelné a rozpoznatelné stopy, jak tomu bylo v dobách, kdy tyto prvky a systémy nebyly používány. Při jejich dokumentaci tak může v lepším případě dojít ke zkreslení jejich skutečného tvaru či délky, v horším případě, nemusí být taková stopa na místě dopravní nehody identifikována a zadokumentována vůbec i při maximálním úsilí dokumentující osoby, což je patrné například z porovnání snímků shodného místa dopravní nehody na **obr. 1**. Kvalita a kvantita zadokumentovaných stop však přímo ovlivňuje výsledky následně prováděné analýzy dopravní nehody, které mohou mít v krajním případě důsledky až v nesprávném posouzení předmětné dopravní nehody při správním či soudním řízení. Podstatnými veličinami pro řešení primárního problému jsou délka brzdné či blokovací stopy a dosažené brzdné zpomalení umožňující odůvodnění výskytu těchto stop.



Obr. 1: Na snímku vlevo je vyobrazena oblast předstřetového pohybu vozidla bezprostředně po dokončení ohledání místa dopravní nehody; vpravo je vyobrazena shodná oblast po sekundárním ohledání (po oschnutí vozovky), kdy byl zjištěn počátek brzdné stopy vozidla o cca 25 m dále⁴

³ JANÍČEK, P., MAREK, J.: Expertní inženýrství v systémovém pojetí

⁴ Archiv ÚSI VUT v BRNĚ

2 SOUČASNÝ STAV

Tato kapitola popisuje kategorizaci stop na místě dopravní nehody, jak je v současné době používána, dále je vysvětlena podstata brzdných a blokovacích stop, základní principy mechanismu jejich vzniku a je popsáno, jakými stopami je nutné se zabývat pro posouzení a stanovení průběhu analyzované dopravní nehody. Dále jsou v kapitole představeny metody identifikace a zaměření stop na místě dopravních nehod používané v praxi příslušníky výjezdových skupin dopravní policie a také již popsané metody identifikace nezřetelných stop.

2.1 KATEGORIZACE STOP NA MÍSTĚ DOPRAVNÍ NEHODY

Během dopravní nehody na jejím místě vznikne množství stop. Stopou dle literatury⁵ se rozumí každá změna, která vznikla v příčinné souvislosti s předmětnou dopravní nehodou, která je zjištělná, zjistitelná a obsahuje informace významné pro vyšetřování a následnou analýzu předmětné události. Pro každou zajištěnou stopu je nutné zjistit způsob jejího vzniku a posoudit, jestli předmětná stopa vznikla v souvislosti s analyzovanou dopravní nehodou nebo již byla na místě dříve (např. pozůstatek předchozí nehody na stejném místě). Při ohledání místa dopravní nehody je možné nalézt velké množství paměťových a materiálních stop.⁶

Paměťové stopy, které se vytvářejí v paměti účastníka či svědka dopravní nehody, jsou důležitým a cenným podkladem pro objasnění příčin dopravní nehody. Z paměťových stop je možné určit nejen průběh dopravní nehody, ale i chování účastníků dopravní nehody, tj. způsob jízdy, použití směrovek, skřípění brzd atd. Paměťové stopy se získávají pomocí výslechu osob⁷.

Na základě vzájemných interakcí systému člověk – vozidlo – prostředí vznikají všechny stopy využívané při odhalování a vyšetřování dopravních nehod a analýze průběhu nehodového děje. Na základě změn způsobených odrazem je pak možné usuzovat na způsob, jakým prvek působil na jiný prvek systému, na druh, intenzitu a délku trvání této interakce.⁸ V knize Kriminalistika – dopravní nehody⁹ byly již v roce 1968 definovány základní kategorie materiálních stop vzniklých na místě dopravní nehody:

- stopy vozidel na vozovce,
- stopy na zúčastněných vozidlech,
- stopy kapalin,

⁵ DOLEŽEL, J., NOVÁK Č., VOLF Z.: Kriminalistické minimum, 1. vyd.

⁶ KONEČNÝ, J.: Šetření a dokumentace silničních dopravních nehod, 1. vyd.

⁷ PORADA, V.: Silniční dopravní nehoda v teorii a praxi

⁸ BRADÁČ, A.: Soudní inženýrství

⁹ ČERMÍN, S. a kol.: Kriminalistika dopravní nehody

- stopy způsobené vozidly na pevných objektech,
- stopy na tělech účastníků nehody.

Stopy vozidel na vozovce jsou veškeré zanechané stopy na svrchní vrstvě vozovky v příčinné souvislosti se vznikem dopravní nehody a nehodového děje. Některé druhy těchto stop jsou dobře viditelné a rozpoznatelné lidským okem, pro detekci zbylých je zapotřebí důkladné zkoumání povrchu vozovky pomocí speciálních metod a přístrojů – což je obsahem této dizertační práce a bude popsáno podrobněji v dalších samostatných kapitolách.

Stopy na zúčastněných vozidlech vznikají při střetu vozidel jako důsledek působení rázových sil, kdy dochází k přeměně části předstřetové kinetické energie vozidel na deformační práci, viz **obr. 2**, která deformuje jejich části. Rozsah deformací je přímo úměrný střetové rychlosti vozidel, čím vyšší je střetová rychlost vozidel, tím rozsáhlejší deformační projevy jsou patrné na vozidlech. Na základě charakteru a rozsahu deformací je možné určit přibližnou střetovou rychlost (při známé postřetové rychlosti). Mimo stop poškození venkovních částí vozidla, dochází při vyšších střetových rychlostech také k poškození interiéru vozidla např. poškození sedadla, volantu a palubní desky vlivem kontaktu s posádkou vozidla.



Obr. 2: Stopy na exteriéru a interiéru poškozeného vozidla po dopravní nehodě¹⁰

Stopy kapalin jsou nejčastěji stopy vyteklé brzdové nebo chladicí kapaliny, oleje nebo elektrolytu akumulátoru. Může se však také jednat o stopy převážených kapalin. Tyto stopy jsou mnohdy důležitým vodítkem pro určování místa střetu vozidel na vozovce. Vzhledem k umístění chladiče v přední části vozidla dochází při nárazu jeho přední části velmi často k jeho poškození. Dojde tedy k úniku chladicí kapaliny, která vystřikuje nebo padá na vozovku a vyznačuje tak pohyb vozidla z místa střetu do jeho konečné polohy. Do této kategorie svým způsobem spadají i stopy krve. Důležitost těchto stop lze spatřit především ve skutečnosti, že v řadě případů spolehlivě ukazují na dodatečné změny polohy zraněných či usmrčených osob i zvířat, a také změny polohy vozidla po dopravní nehodě. Ze zjištěné krevní stopy pak lze rozpoznat jak místo, kam osoba po

¹⁰ Archiv ÚSI VUT v BRNĚ

nárazu vozidla dopadla, tak i místo, kde vozidlo po dopravní nehodě zastavilo (před jeho přemístěním např. z důvodu prací integrovaného záchranného systému), nebo místo, kde byla zraněná osoba později naložena do sanitky. Také stopy oleje z motoru vozidla, chladicí tekutiny z chladiče vozidla nebo elektrolytu vyteklého z akumulátoru převráceného či poškozeného vozidla, viz **obr. 3**, mohou označit místa, kde byly příslušné části poškozeny nebo kde zůstalo převrácené vozidlo ležet.¹¹



Obr. 3: Stopy kapalin na místě dopravní nehody¹²

Stopy způsobené vozidly na pevných objektech vznikají nejčastěji v důsledku vyjetí vozidla mimo komunikaci a následného kontaktu s pevnými objekty v jejím bezprostředním okolí, typicky svodidla, stromy, sloupy veřejného osvětlení, dopravní značení, příkopy, stavby podél komunikace atd. Kontaktem vozidla s těmito objekty vznikají tzv. vstříčné stopy, někdy také nazývané „protistopy“, kterými jsou nejčastěji otěry laků a povrchových nátěrů, případně i části samotného objektu, se kterým se vozidlo střelo, viz **obr. 4**. Tyto stopy jsou velmi důležité zejména v případech, kdy řidič vozidla ujel z místa dopravní nehody.¹³



Obr. 4: Stopy vozidel na pevných objektech¹⁴

¹¹ ŠACHL, J.: Zvláštnosti stop na místech dopravních nehod. Soudní inženýrství č.6, 2002

¹² DVOŘÁČEK, T.: Metodika ohledání dopravní nehody policií

¹³ MUSIL, J., KONRÁD, Z., SUCHÁNEK, J.: Kriminalistika 2

¹⁴ www.denik.cz, archiv ÚSI VUT v BRNĚ

Stopy na tělech účastníků nehody mohou být mnohdy velmi nápomocné k analýze a stanovení příčin vzniku dopravní nehody. Tyto stopy je možné kategorizovat stejně jako zranění, která obvykle doprovázejí, a to na vnější (zjistitelné pouhým okem) a vnitřní (zjistitelné pomocí specializovaného zařízení či lékařského zásahu). Charakter a poloha zranění osob může být zásadním podkladem pro stanovení průběhu nehodového děje a na jehož základě je možné určit, v jaké pozici se poraněná osoba nacházela vůči vozidlu v okamžiku střetu. Mezi charakteristické stopy na tělech osob patří zejména otlaky od bezpečnostních pásů jak na tělech, tak na oblečení, oděrky a zranění způsobené aktivací airbagů¹⁵, viz **obr. 5**.



Obr. 5: Stopy na tělech účastníků DN, vlevo – stopy přejetí vozidlem; vpravo – stopy bezpečnostních pásů¹⁶

2.2 STOPY POHYBU VOZIDEL NA VOZOVCE

Na vozovce v místě dopravní nehody obvykle vznikne množství stop vozidel. Z pohledu tématu této dizertační práce jsou nejdůležitější stopy pneumatik vozidel, které je možné z hlediska tření rozdělit na dvě základní skupiny: otisky a otěry. V praxi jsou ale vzniklé stopy rozděleny do několika kategorií:

- jízdní stopy
- brzdné stopy
- blokovací stopy
- smykové stopy
- akcelerační stopy
- dřecí a rycí stopy

¹⁵ CHMELÍK J. a kol.: Dopravní nehody

¹⁶ Archiv ÚSI VUT v BRNĚ

2.2.1 Jízdní stopy

Jízdní stopa pneumatiky vznikne, pohybuje-li se kolo rychlostí odpovídající jeho obvodové rychlosti. Jejich kvalita závisí na typu povrchu vozovky, vozidle a stavu samotných pneumatik. Zpravidla je možné jasně rozeznat vzorek dezénu, protože dochází k jeho otisku na podložku, viz **obr. 6**. Povrch, na kterém se pneumatika pohybuje, je v takových případech zpravidla měkký (nezpevněná krajnice, sypký materiál, bláto, sníh apod.). Jízdní stopy však mohou za určitých podmínek vzniknout i na asfaltu. Naopak velmi obtížně zjistitelné jsou na dlažebních kostkách. Šířka stopy je maximálně rovna šířce kontaktní plochy pneumatiky, u správně nahuštěné pneumatiky tedy maximálně šířce běhounu pneumatiky. Málo nahuštěná pneumatika nebo pneumatika po defektu zanechá na vozovce charakteristickou stopu převalování pneumatiky ze strany na stranu, někdy i se stopami ráfku. V místech, kde se vozidlo zastaví střetem s překážkou, vznikne v měkkém povrchu vozovky hlubší stopa po opětovném dosednutí vozidla po střetu.¹⁷



Obr. 6: Jízdní stopy vozidla otištěné do původně měkkého podkladu¹⁸

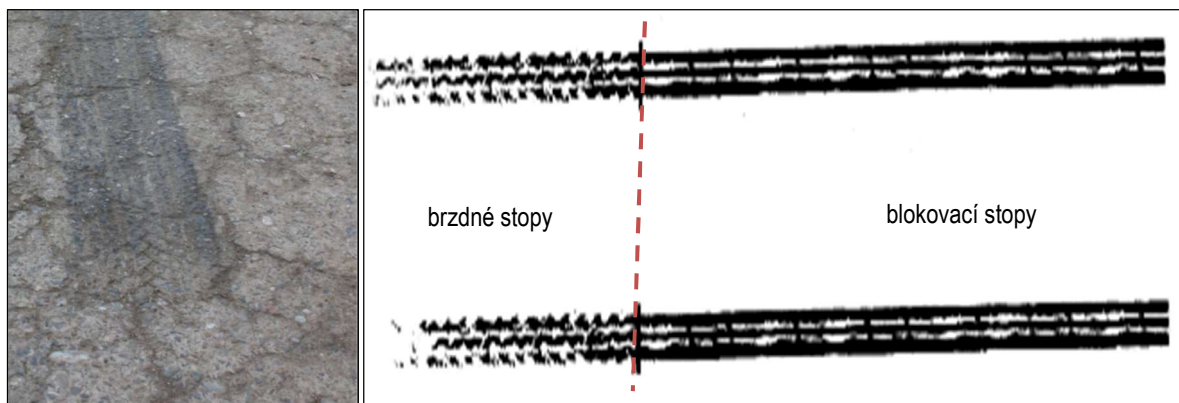
2.2.2 Brzdné stopy

Brzdná stopa vzniká otěrem pneumatiky o podložku při skluzu (rozdílu mezi skutečnou a teoretickou dráhou pneumatiky) v intervalu (0 %; 100 %), což znamená, že nedochází k zablokování kola a kolo si zachovává svou směrovou stabilitu. V takové stopě je možné zpravidla rozeznat jednotlivé drážky dezénu, někdy i figury, viz **obr. 7**. Na vozovce v tomto případě vznikají pruhy s otěrem a pruhy bez otěru pryže z pneumatiky. Šířka pruhů musí odpovídat šířce dezénu zatížené pneumatiky. Při zanechání tohoto typu stopy lze konstatovat, že vozidlo dosáhlo nejvyšší míry intenzity zpomalení při brzdění. Rozpoznání brzdných stop od stop blokovacích, je velmi obtížné a vyžaduje velké zkušenosti a praxi.¹⁹

¹⁷ PORADA, V.: Silniční dopravní nehoda v teorii a praxi

¹⁸ archiv autora

¹⁹ PORADA, V.: Silniční dopravní nehoda v teorii a praxi



Obr. 7: Detail části brzdné stopy s rozeznatelným dezénem pneumatiky, přechod brzdné a blokovací stopy²⁰

2.2.3 Blokovací stopy

Blokovací stopa vzniká při zablokování brzděného kola. Skluz pneumatiky je v takovém případě roven 100 %. Ve stopě otěru pneumatiky jsou rozeznatelné pruhy po otěru pryže bez rozeznání figur dezénu a pruhy bez otěru, tedy drážky dezénu. Pokud při brzdění vzniká blokovací stopa, často dochází, zejména při vyšších rychlostech, k poškození běhounu pneumatiky vytvořením viditelné plošky, viz **obr. 8**. Správně fungující systém ABS by měl zabránit zablokování kola, neměla by tedy vzniknout blokovací, ale brzdná stopa. U starších generací systému ABS, docházelo k částečné blokaci kola během intenzivního brzdění vozidla, takto vzniklá stopa je tedy kombinací stopy brzdné a blokovací.²¹ Moderní brzdové systémy pak blokaci kol umožňují při nízkých rychlostech pro dosažení maximálního zpomalení vozidla.



Obr. 8: Blokovací stopy²²

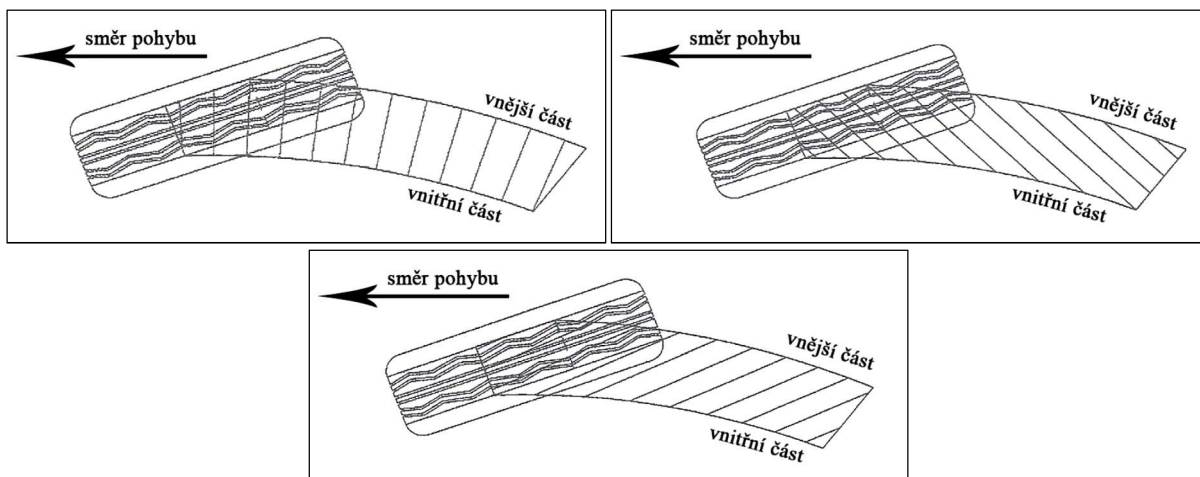
²⁰ archiv autora

²¹ PORADA, V.: Silniční dopravní nehoda v teorii a praxi

²² archiv autora

2.2.4 Smykové stopy

Smyková stopa vzniká při ztrátě směrové stability kola, velmi často při bočním smyku, kdy se kolo může pouze odvalovat či akcelerovat, nebo může být brzděno, viz **obr. 9**.



Obr. 9: Smykové stopy, vlevo – volně odvalujícího se kola; vpravo – brzděného kola; dole – akceleroujícího kola²³

Smyková stopa může vzniknout i u vozidla vybaveného ABS. Smyková stopa bývá ve většině případů dobře viditelná a rozeznatelná²⁴, viz **obr. 10**.



Obr. 10: Smykové stopy²⁵

2.2.5 Akcelerační stopy

Akcelerační stopa je stopa, kterou zanechá pneumatika kola, jehož obvodová rychlost je vyšší než rychlost pohybu. Je to způsobeno neschopností adheze přenést celou sílu působící na obvod kola a objevuje se pouze u poháněných kol. Šířka stopy bude rovna šířce kontaktní plochy pneumatiky. U těchto stop je možné pozorovat tmavší začátek a světlejší konec – vlivem změny rychlosti přestane být pneumatika v dostatečném prokluzu, aby zanechávala stopu, viz **obr. 11**.

²³ CHMELÍK, J. a kol.: Dopravní nehody

²⁴ PORADA, V.: Silniční dopravní nehoda v teorii a praxi

²⁵ archiv autora

Pokud je vozidlo vybaveno systémem ovládání trakce (například ASR), bude existovat jen málo stop otěru při zrychlení, protože tento systém zamezuje prokluzu pneumatiky, pokud zjistí skluz blíží se 100 % - mohou tak vzniknout krátké stopy, než systém zafunguje.²⁶



Obr. 11: Akcelerační stopy výkonného sportovního vozidla²⁷

2.2.6 Dřecí a rycí stopy

Tento typ stop vzniká tlakem tvrdých předmětů na vozovku při pohybu. Nemusí se vždy jednat o stopy způsobené pouze vozidlem, velmi často se jedná o stopy předmětů či překážek, do kterých vozidlo narazilo a tyto pak byly odraženy, tlačeny nebo vlečeny ze svých původních do konečných poloh. U vozidel vznikají dřecí stopy nejčastěji v případech ztráty či perforace (s následným únikem vzduchu) pneumatiky, uvolnění některého dílu ve spodní části vozidla (např. výfuk) nebo při převrácení vozidla. Tímto způsobem vznikají stopy dřením disku či brzdového kotouče nebo bubnu na vozovce, různé stopy odřeného nátěru vozidel, rycí stopy po různých předmětech, střepích světlometů, dveří a oken vozidla, odlétnutými těžkými předměty (náklad) apod.²⁸, viz **obr. 12**.



Obr. 12: Dřecí a rycí stopy²⁹

²⁶ PORADA, V.: Silniční dopravní nehoda v teorii a praxi

²⁷ www.youtube.com/watch?v=d2CmxqcMQcE

²⁸ PORADA, V.: Silniční dopravní nehoda v teorii a praxi

²⁹ archiv autora

2.3 STOPY PNEUMATIK VOZIDEL S BRZDOVÝMI A BEZPEČNOSTNÍMI SYSTÉMY

V dnešní době je většina vozidel vybavena systémem ABS a na něj navazujícími systémy ESP, ASR apod. U prvních generací systému ABS je vzniklá stopa při brzdění vozidla poměrně dobře viditelná a jedná se o jakousi kombinaci brzdných a blokovacích stop, střídajících se ve velmi krátkém časovém úseku, viz **obr. 13**. Na pevném povrchu jsou tyto stopy lépe patrné při bočním pohledu nebo při šikmém osvětlení, jeví se jako střídání tmavých a lesklých pruhů na vozovce. Na měkkém povrchu jsou pak tyto stopy dobře patrné a jsou hlubší než stopy jízdní. Viditelné bývají tyto stopy také po fotografické expozici.³⁰



Obr. 13: Stopa pneumatiky vozidla s ABS³¹

Obecně budou stopy pneumatik nejlépe vidět na dobře udržovaných asfaltových površích. Dobrá rozpoznatelnost bude také na šterku, v prachu a na měkkých površích. Na betonu a starém – světlém asfaltu mohou být zanechané stopy jen slabé nebo vůbec žádné, viz **obr. 14**. Tmavé stopy po pneumatikách jsou důsledkem vyšších teplot, pravděpodobnost, že budou nalezeny a budou dobře dokumentovatelné, bude větší v teplém počasí při zanechání dlouhých stop než při krátkých stopách za chladného počasí. Vznik otěrové stopy pneumatiky je závislý na struktuře povrchu vozovky, na teplotě povrchu vozovky atd. a rovněž závisí na jakosti a stavu běhounu pneumatiky.



Obr. 14: Pohledy na vozovku, na které bylo provedeno zabrzdění z rychlosti 70 km/h (vlevo starý povrch, vpravo nový povrch)³²

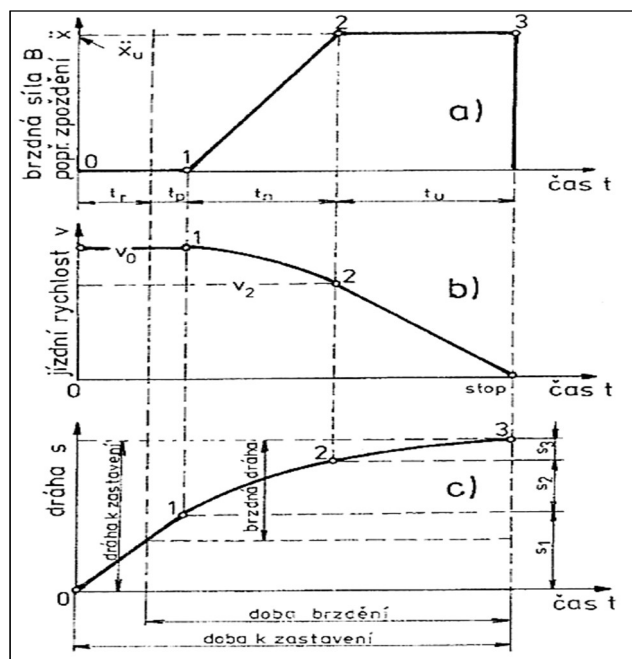
³⁰ PORADA, V.: Silniční dopravní nehoda v teorii a praxi

³¹ archiv autora

³² archiv autora

2.4 PRŮBĚH BRZDĚNÍ VOZIDLA A VZNIK BRZDNÝCH STOP NA VOZOVCE

Z pohledu technické analýzy dopravních nehod fáze brzdění vozidla začíná v okamžiku zpozorování překážky, či vyhodnocení kritické situace řidičem vozidla. Časový interval, který uběhne od tohoto okamžiku po vyvození síly na brzdový pedál, se nazývá *reakční doba* t_r , během této doby však vozidlo nijak nezpomaluje. Z pohledu stop mohou během této doby vzniknout stopy jízdní nebo smykové (pokud se již vozidlo pohybovalo z jiných důvodů ve smyku). Doba od okamžiku, kdy řidič začíná působit na brzdový pedál, po okamžik, kdy se začne projevovat účinek brzdění vozidla, se nazývá *dobou prodlevy brzdění* t_p . Během této doby dochází k překonání vůlí v kloubech a ložiskách a dosednutí brzdového obložení na třecí plochu brzd. Z pohledu stop pneumatik mohou během této doby vzniknout opět pouze jízdní nebo smykové stopy. Při zanedbání jízdních odporů bude rychlost vozidla během obou již popsanych dob rovna *výchozí rychlosti vozidla* v_0 . Od okamžiku projevoování brzdného účinku po okamžik, kdy brzdný účinek dosáhne své plné výše, uplyne doba, která se nazývá *dobou náběhu brzdění* t_n . Z pohledu stop pneumatik mohou během této doby vzniknout brzdné, jízdní nebo smykové stopy. Doba mezi plným náběhem brzd a okamžikem, kdy vozidlo zastaví do nulové rychlosti či narazí, se nazývá *dobou brzdění* t_b – během této doby mohou vzniknout brzdné, blokovací, jízdní i smykové stopy pneumatik na vozovce. Dráha potřebná k zastavení vozidla je rozčleněna, stejně jako doba k zastavení vozidla, na několik úseků – ujetá dráha během reakce řidiče, během náběhu brzd atd. Grafické znázornění průběhu brzdění je patrné z následujícího **obr. 15**.



Obr. 15: Průběh brzdění³³

³³ VLK, F.: Dynamika motorových vozidel

Brzdnou dráhou vozidla se rozumí dráha, kterou urazí vozidlo od okamžiku působení řidiče vozidla na brzdový pedál do zastavení nebo nárazu vozidla – není v ní tedy zahrnuta reakční doba řidiče. Brzdná dráha se vypočítá ze vztahu:

$$s = v_0 \cdot t_p + \left(v_0 \cdot t_n - \frac{a \cdot t_n^2}{4} \right) + \frac{\left(v_0 - \frac{a}{2} \cdot t_n \right)^2}{2 \cdot a}$$

Během brzdění je zrychlení vozidla záporné, stejně jako síly působící na obvodech brzděných kol. Poměr záporného zrychlení k tíhovému zrychlení se nazývá poměrné zpomalení:

$$z = -\frac{a}{g}$$

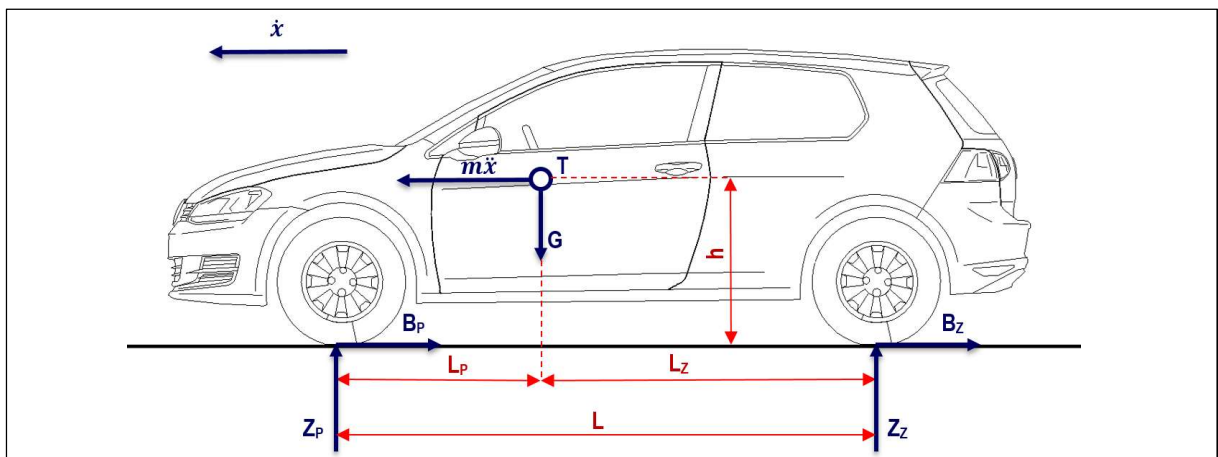
V těžišti vozidla působí setrvačná síla

$$m \cdot a = G \cdot z$$

na nápravách pak působí brzdné síly B_p a B_z , přičemž platí vztah:

$$B_p + B_z = G \cdot z$$

Rozložení sil působících na vozidlo při brzdění je patrné z **obr. 16**.



Obr. 16: Síly působící na vozidlo při brzdění³⁴

Maximální brzdné síly jsou omezeny přilnavostí třecí dvojice pneumatika – vozovka. Největší síly, které lze přenést jsou tedy:

$$B_{pmax} = \mu_v \cdot Z_p ; B_{zmax} = \mu_v \cdot Z_z$$

kde μ_v je součinitel přilnavosti v podélném směru pneumatiky.

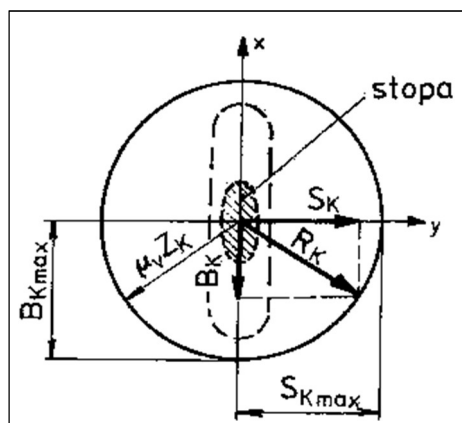
³⁴ VLK, F.: Dynamika motorových vozidel

Pokud ve stopě pneumatiky působí mimo obvodovou sílu také boční síla, pak nesmí být geometrický součet těchto sil větší než určitá hodnota, která závisí na přilnavosti, aby nedošlo ke smyku vozidla a tím i vzniku smykové stopy vozidla. Pokud je přilnavost pneumatiky stejná v podélném i příčném směru (Kammova kružnice přilnavosti na **obr. 17**), pak výslednice sil:

$$R_K = \sqrt{B_K^2 + S_K^2} \leq \mu_V \cdot Z_K$$

kde B_K je brzdná síla kola, S_K je boční vodící síla kola a Z_K je radiální reakce kola.

Geometrickým místem bodů vektoru výsledné přenositelné vodorovné síly R_K je kružnice opsaná ze středu s poloměrem $\mu_V \cdot Z_K$, viz **obr. 17**. Je-li brzdná síla větší než B_{Kmax} , pak dochází k zablokování kola, vzniku blokovacích stop a k pohybu smykem bez boční vodící síly.



Obr. 17: Kammova kružnice ³⁵

Stabilita vozidla a vznik stop při brzdění jsou závislé na rozdělení celkové brzdné síly vozidla mezi jednotlivé nápravy vozidla, tzn. na tom, u které nápravy dojde k blokaci kola a tím ke vzniku silové dvojice, která natáčí vozidlo kolem svislé osy, čímž dochází ke smyku vozidla.

Pokud neleží setrvačná síla vlivem vnější rušivé síly ve směru podélné osy vozidla, ale pod úhlem α , pak vznikne složka rušivé síly F_Y kolmá k podélné ose. Tato složka je obvykle udržována v rovnováze bočními silami na kolech. Blokují-li kola zadní nápravy, pak je boční vodící síla zadní nápravy $S_Z = 0$ a boční síly vozidla pak přenášejí pouze přední kola. Následkem je vznik silové dvojice a smyku. Tímto se úhel α zvětšuje, což znamená nestabilní děj. Pokud ale blokují kola přední nápravy, přenášejí boční sílu pouze kola zadní nápravy a úhel α se zmenšuje – tímto se vozidlo stáčí do směru setrvačné síly a vozidlo se pohybuje přibližně ve stejném směru jako před brzděním a chová se stabilně. Při jízdě zatáčkou to však znamená, že vozidlo pokračuje smykem ven ze zatáčky. Blokují-li všechny nápravy vozidla současně a nepůsobí-li na vozidla žádná rušivá síla, pak se vozidlo pohybuje přímým směrem.

³⁵ VLK, F.: Dynamika motorových vozidel

Primárním úkolem pneumatik vozidla je přenos obvodových a bočních sil mezi vozidlem a vozovkou, bez kterých by nebylo možné se s vozidlem rozjet, zastavit, případně zatočit. Velikost těchto sil je omezena adhezí, tj. schopností materiálu pneumatiky přilnout k materiálu vozovky. Okamžitý součinitel adheze je závislý na směsi a stavu povrchu (běhounu) pneumatiky, dále na materiálu a stavu povrchu vozovky, ale také na rychlosti pohybu vozidla a velikosti skluzu mezi pneumatikou a vozovkou.

Při odvalování pneumatiky po vozovce dochází k její pružné deformaci, což znamená rozdíl mezi skutečnou a teoretickou dráhou, kterou měla pneumatika urazit. Rozdíl těchto drah je nazýván skluz. Skluz vzniká vždy, i při pouhém odvalování kola, nejvíce však při brzdění a zrychlování. Pro volně otáčející se kolo (při zanedbání valivého odporu) platí, že velikost skluzu je rovna nule, pro zablokované kolo je hodnota skluzu 100 %. Při běžné jízdě vozidla se tedy vždy vyskytuje skluz pneumatiky. Hodnoty skluzu pneumatiky do 20 až 30 % jsou ještě obecně akceptovány za přijatelný stav a tato oblast hodnot bývá označována jako oblast stabilního skluzu – asistenční systémy moderních vozidel v takových situacích nijak nezasahují a vzniklou situaci nepovažují za kritickou. Je-li skluz větší, tj. jeho hodnota spadá do tzv. oblasti nestabilního skluzu, pak hrozí ztráta ovladatelnosti vozidla a asistenční systémy vozidel obvykle zasahují a vznikají výraznější otěry (stopy) pneumatik na vozovce.

$$s = \left| \frac{v_v - v_k}{v_v} \right| \cdot 100\%$$

kde je s – skluz v %; v_v – rychlost vozidla v m/s; v_k – obvodová rychlost kola v m/s. ³⁶

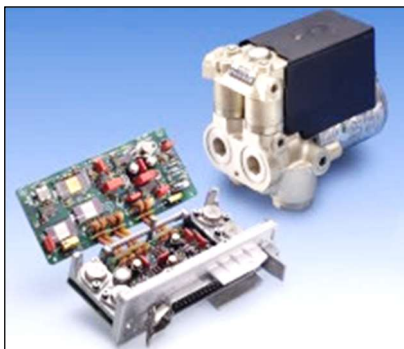
2.5 VÝVOJ ASISTENČNÍCH SYSTÉMŮ S VLIVEM NA BRZDNÉ STOPY VOZIDEL

Hlavní funkcí těchto systémů je zajistit bezpečnost jak řidiče, tak vozidla při jízdě, zejména pak při krizových situacích. K tomu systémy využívají několik soustav snímačů, monitorujících povely řidiče, dění v okolí vozidla, ale i samotné chování vozidla. Signály z těchto snímačů jsou následně zpracovány v řídicích jednotkách, které na základě stanovených algoritmů vyhodnotí situaci a vyšlou signál akčním členům systémů. Tendence vývoje systémů je jednoznačně spojena s vývojem použitých snímačů a výpočetní techniky. V současné době jsou již systémy natolik vyspělé, že dovedou vyhodnotit nebezpečnou situaci ještě předtím, než nastane. Jedním z nejznámějších a také z nejstarších systémů je protiblokovací systém ABS, na jehož vývoji lze demonstrovat vývoj v této oblasti. ³⁷

³⁶ VLK, F.: Dynamika motorových vozidel, Bradáč, A.: Soudní inženýrství

³⁷ VLK, F.: Automobilová elektronika 1: asistenční a informační systémy. 1. vyd.

Protiblokovací systém ABS (z anglického Anti-lock Braking System) byl vyvinut v roce 1978 společností Bosch. Samotná snaha zabránit blokaci kol vozidla při prudkém brzdění je ale mnohem starší. Už v roce 1936 ohlásila firma Bosch patent na „Zařízení k zabránění silného brzdění kol motorového vozidla“. Tohoto se podařilo docílit až s příchodem elektroniky do automobilového průmyslu, čímž bylo umožněno vyvinout a sestavit zařízení dostatečně rychlé a schopné použití v motorových vozidlech. Prvním vozidlem vybaveným tímto systémem, viz **obr. 18**, byl Mercedes-Benz třídy S.³⁸



Obr. 18: Historicky první ABS od firmy Bosch (model 2S z roku 1978)³⁹

2.5.1 ABS 2S

Tato verze systému byla firmou Bosch představena v roce 1978. Hydraulický agregát a řídicí jednotka byly konstrukčně odděleny. Tříkanálový hydraulický agregát obsahoval čerpadlo hnané elektromotorem pro zpětnou dodávku a tři 3/3 (trojcestný/třípolohový) elektromagnetické ventily regulující tlak. Tento systém mohl být trojsnímačový – obě přední kola, pastorek stálého převodu zadní nápravy; nebo čtyřsniímačový – všechna kola. Při rozdělení na přední a zadní nápravu měl na starosti regulaci zadní nápravy pouze jediný elektromagnetický ventil. Při diagonálním rozdělení dva – každé kolo patřilo jednomu brzdovému okruhu.⁴⁰



Obr. 19: Integrovaná řídicí jednotka ABS 2S do hydraulické jednotky⁴¹

³⁸ SAJDL, J.: ABS (Anti-lock Braking System). Autolexicon.net [online]. [cit. 2016-12-20]

³⁹ KOS, J.: 2010: Historie ABS [online]. [cit. 2016-12-20]

⁴⁰ VLK, F.: Elektronické systémy motorových vozidel. 1. vyd.

⁴¹ KOS, J.: 2010: Historie ABS [online]. [cit. 2016-12-20]

2.5.2 ABS 5.0

Protiblokovací systém Bosch ABS 5.0 vznikl inovací systému ABS 2E. Největší rozdíl proti ABS 2E byl v elektromagnetických ventilech hydraulické jednotky – systém ABS 5.0 disponoval 2/2 cestnými elektromagnetickými ventily. Značná byla také hmotnostní úspora, kdy hmotnost nové generace byla téměř o polovinu nižší. Hlavními znaky systému byly především princip zpětné dodávky s uzavřeným brzdovým okruhem a princip dvou paralelně pracujících mikropočítačů s rozsáhlým kontrolním softwarem. Pokud byly oba vstupní signály do mikroprocesorů shodné, musely být shodné i signály výstupní. Došlo-li v průběhu výpočtů k odchylce mezi těmito signály, byla rozpoznána chyba a ABS bylo vypnuto. Tímto způsobem byla neustále kontrolována správná funkce systému.⁴²



Obr. 20: Vlevo – ABS 2E s řídicí jednotku integrovanou do bloku s hydraulickou jednotkou; vpravo – ABS 5.0⁴³

2.5.3 ABS 5.3

Tento systém měl mnohem menší zástavbové rozměry při zachování stejných funkcí, jako měl systém ABS 5.0, díky tomu bylo možné jej použít i u vozidel nižších tříd. Elektromagnetické ventily byly umístěny odděleně, hydraulické části byly integrovány v hydraulické jednotce a elektrické části byly umístěny na tělese řídicí jednotky. Elektronická řídicí jednotka mohla být umístěna přímo na hydraulické jednotce nebo odděleně a propojena kabelovým svazkem.⁴⁴

ABS s elektronickým rozdělením brzdné síly EBD (Electronic Brakeforce Distribution) je software, kterým jsou citlivěji rozdělovány brzdné síly, přičemž je zde zahrnutý vliv změny zátěže na jednotlivých nápravách. Systém je využíván nejen při kritickém ale i při normálním brzdění, regulace se uskutečňuje ve stabilní oblasti skluzu.

⁴² VLK, F.: Automobilová elektronika 1: asistenční a informační systémy. 1. vyd.

⁴³ KOS, J.: 2010: Historie ABS [online]. [cit. 2016-12-20]

⁴⁴ VLK, F.: Automobilová elektronika 1: asistenční a informační systémy. 1. vyd.







Obr. 21: Vlevo – ABS 5.3; vpravo – ABS 8.0 ⁴⁵

ABS 5.3 se skládalo z 25 součástí (vlevo). Varianta 8.0 se pak skládá ze 16 komponent.

2.5.4 ABS 8.0

Tato generace systému ABS byla uvedena firmou Bosch v roce 2003. Oproti předchozí generaci došlo opět ke snížení hmotnosti na přibližně 1,6 kg a zástavbového prostoru. Výraznou změnou je ovšem integrace dalších systémů jako ASR a ESP.

25 years of ABS 1978 – 2003				
smaller, lighter, more efficient				
				
generation	ABS 2	ABS 2E	ABS 5.3	ABS 8.0
weight in kg	6,7	4,9	2,6	1,6
number of components of ECU	140	40	25	16
memory size in kByte	2	8	24	128
	1978	1989	1995	2003

Obr. 22: Vývoj a miniaturizace systému ABS v letech 1978 až 2003⁴⁶

2.5.5 Vývoj ABS jako součásti dalších asistenčních systémů

V posledních letech je brzdový systém ABS zařazen jako jedna z částí nadřazeného stabilizačního systému ESP (Electronic Stability Programme, nebo ESC - Electronic Stability Control), který zahrnuje mnoho dalších asistenčních systémů. Jednoznačným trendem vývoje je zkracování trvání procesu získání a vyhodnocení dat a případného zásahu.

⁴⁵ KOS, J.: 2010: Historie ABS [online]. [cit. 2016-12-20]

⁴⁶ www stránky společnosti Robert Bosch, GmbH, [Online]

Než se ABS stalo součástí dalších systémů okolo roku 2000, byla délka celého procesu 20 ms, přičemž v průběhu brzdění vznikla na počátku krátká stopa 40 až 50 cm - regulace byla řízena pouze skluzem předních kol, tj. velký počáteční skluz vozidla, viz **obr. 23**. Dle adheze a stavu pneumatik pak v průběhu brzdění mohlo vzniknout několik dalších stop různé délky. Před zastavením vozidla pak žádná brzdná stopa nevznikala.



Obr. 23: Průběh brzdění vozidla Škoda Octavia I. generace (1999) z rychlosti 100 km/h⁴⁷

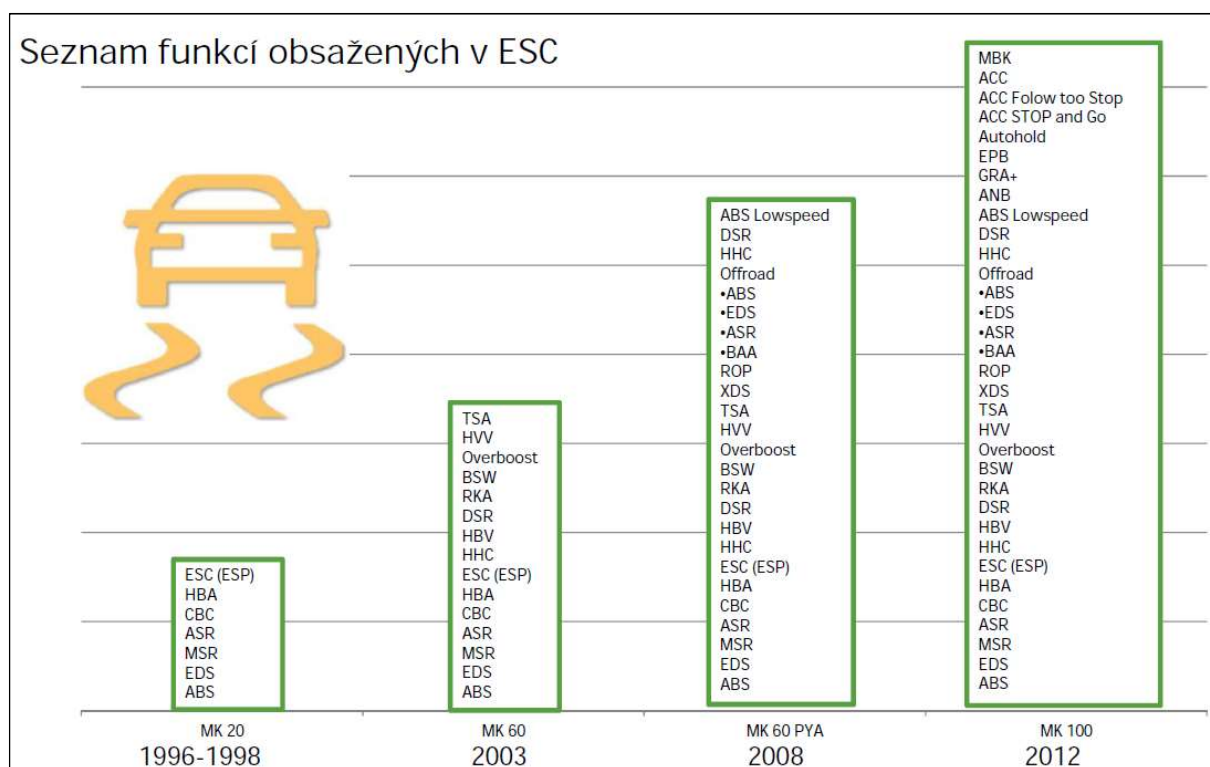
Postupným vývojem došlo ke zvýšení frekvence a zkrácení procesního času na 8 ms okolo roku 2008, **obr. 24**. Od roku 2012 se pak trvání celého procesu pohybuje v úrovni 5 ms a méně, v průběhu brzdění pak na samém počátku brzdná stopa nevzniká, případně je nezřetelná. Regulační smyčka nových generací asistenčních systémů umožňuje před zastavením vozidla blokaci kol, při nízkých rychlostech není nutné řešit stabilitu vozidla, mohou tedy vzniknout viditelné brzdné stopy.

⁴⁷ KRAUS, P.: Generační vývoj systému ABS a jeho vliv na indikaci brzdné stopy na vozovce, ExFOS 2015



Obr. 24: Průběh brzdění vozidla Škoda Fabia III. generace (2014) z rychlosti 100 km/h⁴⁸

Rozvoj funkcí systému ESC vozidel Škoda v letech 1996 až 2012 je zřejmý z **obr. 25**.



Obr. 25: Rozvoj funkcí systému ESC vozidel Škoda⁴⁹

⁴⁸ KRAUS, P.: Generační vývoj systému ABS a jeho vliv na indikaci brzdné stopy na vozovce, ExFOS 2015

⁴⁹ KRAUS, P.: Generační vývoj systému ABS a jeho vliv na indikaci brzdné stopy na vozovce, ExFOS 2015

2.6 SOUČASNÉ METODY ZÁZNAMU STOP NA MÍSTĚ DN

2.6.1 Rozpoznání stop

Postupy, které v současné době používá Policie ČR pro identifikaci a dokumentaci stop na místě dopravní nehody, byť stále funkční, jsou několik desítek let prakticky shodné, a především jsou závislé na subjektivních schopnostech ohledávajících a dokumentujících příslušníků. Přestože vývoj nejen v oblasti bezpečnostních a asistenčních systémů vozidel, ale také v oblasti dokumentačních prostředků, je značný, z pohledu metod identifikace a dokumentace stop na místě dopravních nehod tomu tak není. Kvalita i kvantita zadokumentovaných stop je přímo závislá na schopnostech vizuálního vnímání dokumentující osoby, což je v mnoha případech značně negativní faktor. Limitující jsou i atmosférické podmínky, kdy za deště nebo v noci je identifikace i dokumentace stop významným způsobem ztížena.

Hlavní vlastnosti nově navržené metody identifikace a dokumentace stopy by měly být jednoduchost, použitelnost za jakýchkoliv podmínek, přesnost a minimální subjektivní ovlivnitelnost dokumentujícími osobami.

V případě, že je stopa na místě dopravní nehody identifikována, pak je zadokumentována nejčastěji jednou z níže popsaných metod.

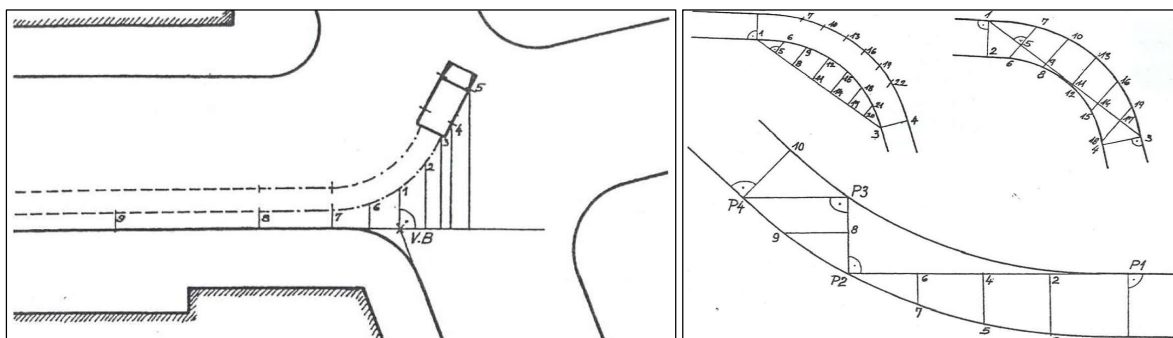
2.6.2 Metody dokumentace používané policií ČR

Zaměření místa DN

Zaměření místa dopravní nehody je jednou z náročných a velmi důležitých činností, které vykonává policie na místě dopravní nehody. Nepřesnosti, nedostatky či chyby v zaměření místa dopravní nehody mohou významným způsobem negativně ovlivnit následné právní posouzení dopravní nehody a případné znalecké zkoumání. V současné době jsou pro zaměření místa dopravní nehody používány prakticky tři základní topografické metody, kdy volba vhodné metody je závislá především na tvaru komunikace, na které došlo k dopravní nehodě a rozmístění vozidel na místě dopravní nehody, dalším ovlivňujícím faktorem při volbě metody může být také dostupné technické vybavení pro danou metodu

Metoda pravoúhlých souřadnic (ortogonální metoda) – princip této metody je založen na volbě minimálně dvou výchozích bodů, které jsou dobře identifikovatelné, a mezi těmito body se vytyčí úsečka, která slouží jako základ pravoúhlého souřadného systému, případně je možné použít více různě položených úseček např. okraj pozemní komunikace, čímž vznikne pravoúhlý souřadný systém. Odměřované vzdálenosti jsou tedy od výchozího bodu měření (X) a od paty

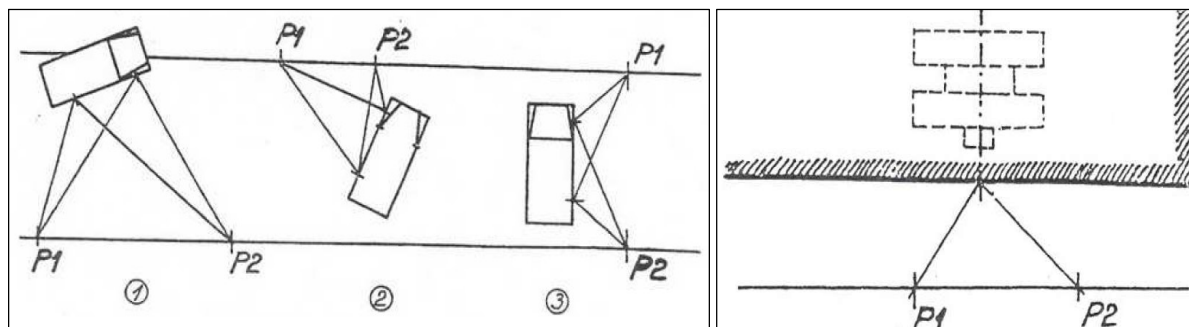
pomyslné vytvořené kolmice k zaměřovanému bodu (Y). Vznikne tak soubor samostatných různě orientovaných pravoúhlých souřadnic, které spolu tvoří celek – plánec místa dopravní nehody. Příklad využití ortogonální metody je zobrazen na následujícím **obr. 26**.



Obr. 26: Příklady použití ortogonální metody⁵⁰

Tato metoda je velmi vhodná pro krátké a rovné úseky, není však vhodná pro zaměření členitých míst dopravních nehod v zatáčkách atd., kdy je velmi pracná a časově náročná.

Metoda průsečného měření (průsečíková) – princip této metody je založen na protínání naměřených délek z předem stanovených výchozích bodů. Obdobně jako u předchozí metody je nutné zvolit alespoň dva výchozí body měření, ale může to být i více bodů, jejichž vzájemná vzdálenost je známá, případně se změří. Zaměřovaný bod je potom zadán jako vzdálenost od těchto dvou bodů a polohou vpravo nebo vlevo od směru od prvního k druhému výchozímu bodu. Princip je zobrazen na následujícím **obr. 27**.



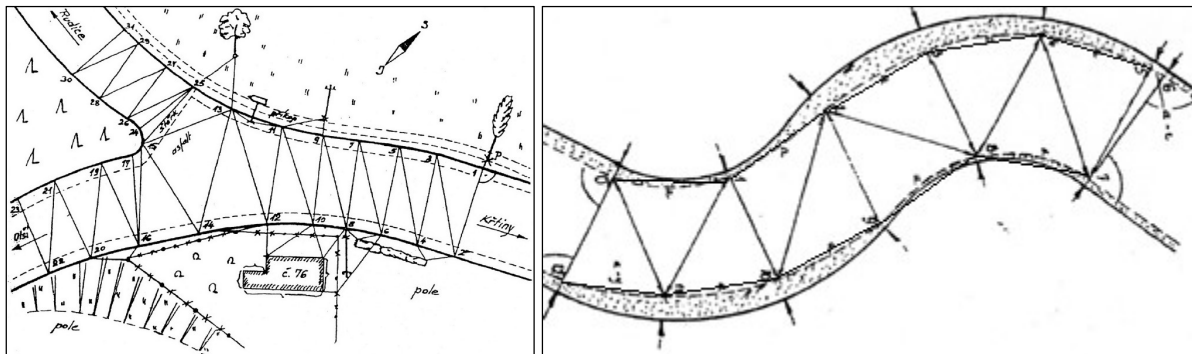
Obr. 27: Příklady použití průsečíkové metody⁵¹

Metoda řetězce trojúhelníků (trojúhelníková) – shodně jako u výše popsaných metod je nutné zvolit dobře identifikovatelný a zaznamenaný výchozí bod měření, od kterého se následně vytyčují trojúhelníky, jejichž vrcholy jsou shodné se zájmovými body měření. Principem je vytváření sítě trojúhelníků tak, že sousední trojúhelníky mají vždy společnou jednu stranu, až do okamžiku, kdy je takovými trojúhelníky pokryta celá požadovaná oblast. Je nutné důsledné značení všech vzdáleností a zaměřovaných bodů. Trojúhelníková metoda je použitelná i pro zaměření

⁵⁰ CHMELÍK, J.: Vyšetřování silničních dopravních nehod

⁵¹ CHMELÍK, J.: Vyšetřování silničních dopravních nehod

členitějších komunikací nebo křižovatek. Způsob využití trojúhelníkové metody patrný z následujícího **obr. 28**.



Obr. 28: Příklady použití trojúhelníkové metody⁵²

Společnou výhodou výše popsaných topografických metod je skutečnost, že tyto je možné realizovat pomocí základních přístrojů a pomůcek. V praxi je nejčastěji používáno měřičské kolečko, jehož výhodou, mimo poměrně nízkých pořizovacích nákladů, je možnost měření délky i křivočarých stop. Přestože výrobci udávaná přesnost měřického kolečka je cca 0,05 %, výsledná nepřesnost měření je umocněna „odskakováním a protáčením“ kolečka na nerovném terénu. V praxi to znamená, že měření musí být několikrát opakováno, u rozlehlejších míst může být odchylka skutečné a naměřené délky i v řádu metrů.⁵³

Využití totální geodetické stanice

V současné době má policie k dispozici několik výjezdových vozidel, která jsou vybavena totální geodetickou stanicí, což je v podstatě elektronický teodolit (přístroj na přesné měření a vytyčování horizontálních a vertikálních úhlů) vybavený elektrooptickým dálkoměrem, v dnešní době se často používá dálkoměr pulzní nebo jeho kombinace s frekvenčním dálkoměrem. Totální geodetická stanice tedy slouží k měření nebo vytyčování vodorovných a svislých úhlů a délek. Délky mohou být měřeny buď pomocí odrazného hranolu, nebo v bezhranolovém módu – odrazem přímo od povrchu měřeného objektu.⁵⁴

Při měření pomocí odrazného hranolu, viz **obr. 29**, lze při dobrých podmínkách měřit až do vzdáleností 1 až 2 km, při odchylce v řádu milimetrů, což je zcela dostačující i pro zaměření rozsáhlých míst dopravních nehod. V případě, že z místa ustavení totální geodetické stanice není přímý rozhled na celou dokumentovanou oblast (zejména stopy a konečné polohy vozidel) lze využít tzv. přestaničení, kdy se stanice přemístí na jiné předem definované a zaměřené místo,

⁵² CHMELÍK, J.: Vyšetřování silničních dopravních nehod

⁵³ TOKAŘ S., STÁŇA I., BILÍK M.: Comparison possibilities of Measurement of Traffic Accident Place. ExFOS 2016

⁵⁴ ŘÍHA, J.: Moderní přístrojová technika. [online] [cit. 13.12.2015]

z kterého lze zaměřit i místa, která byla původně v oblasti zakrytého výhledu. Jasnou výhodou oproti předešlým metodám je přesnost a rychlost dokumentace, kdy časová úspora dokumentace a následného zpracování dat může být i 50 % v porovnání s tradičními topografickými metodami.⁵⁵ Určitou nevýhodou pak může být cena totální geodetické stanice, která se u nového přístroje pohybuje v řádech desítek až stovek tisíc korun.



Obr. 29: Použití totální geodetické stanice na místě dopravní nehody⁵³

Využití GNSS

Využití globálního družicového polohového systému (GNSS, z anglického Global Navigation Satellite System) je finančně i časově podobnou alternativou k využití totální geodetické stanice s odrazným hranolem. Pro měření se používá přijímač, např. na **obr. 30**, který na základě signálů z navigačních družic vypočítává polohu. Přesnost určení polohy záleží na použité technologii. Existuje několik GNSS systémů jako GPS (Global Positioning System, provozovaný Ministerstvem obrany Spojených států amerických), Galileo (evropský systém), GLONASS (systém využívaný ruskou armádou) a čínský Beidou. Výhodou této metody v porovnání s geodetickou stanicí je její rychlost, nevýhodou je pak požadavek na minimální počet dostupných satelitů pro dosažení požadované přesnosti měření (v řádu maximálně jednotek cm).⁵⁶



Obr. 30: GNSS přijímač Trimble X91 s kontrolerem Trimble R8⁵⁷

⁵⁵ STÁŇA, I.; TOKAŘ, S.; BUCSUHÁZY, K.; BILÍK, M. Comparison of Utilization of Conventional and Advanced Methods for Traffic Accidents Scene Documentation in the Czech Republic.

⁵⁶ RAPANT, P.: Družicové polohové systémy

⁵⁷ www.geoserver.cz/gnss-gps-gis-software/geodeticke-gnss

Fotodokumentace

Fotodokumentace je velmi podstatnou součástí dokumentace místa dopravní nehody. Pořízené snímky by měly poskytovat věrný a ucelený pohled na místo dopravní nehody a jeho přilehlé okolí. Mimo to, v případě kvalitních snímků, je možné následně identifikovat stopy, které nebyly přímo na místě dopravní nehody při dokumentaci rozpoznány. Nesprávně provedenou fotodokumentaci však obvykle není možné nahradit kvůli změně podmínek na místě dopravní nehody (odklizení vozidel a střepů, změna atmosférických podmínek atd.). Snímky musí být pořizovány tak, aby zachycovaly číselné označení jednotlivých stop a objektů na místě dopravní nehody. Při pořizování fotografií je potřeba postupovat co nejrychleji z důvodu možnosti znehodnocení stop. Nejdříve by měly být zadokumentovány stopy, předměty a situace, které by mohly zaniknout. K fotodokumentaci by se mělo přistupovat rovněž systematicky, aby nedošlo při ohledání k narušení objektů, popřípadě aby některé významné objekty nebyly opomenuty.⁵⁸

Místo dopravní nehody by mělo být dokumentováno vždy v původním nezměněném stavu, ke kterému může dojít v důsledku ohledání, přestože po příjezdu policie na místo dopravní nehody bývají stopy mnohdy pozměněny nebo dokonce zničeny. Tento nedostatek je však možné do jisté míry eliminovat získáním záznamu například od hasičského záchranného sboru, jehož příslušníci jsou mnohdy na místě dopravní nehody dříve než příslušníci policie, a jsou vybaveni záznamovým zařízením, např. velitel zásahu může mít na svém obleku kameru. Při fotodokumentaci místa dopravní nehody by měly být zachyceny tyto charakteristické záběry: ^{58, 59}

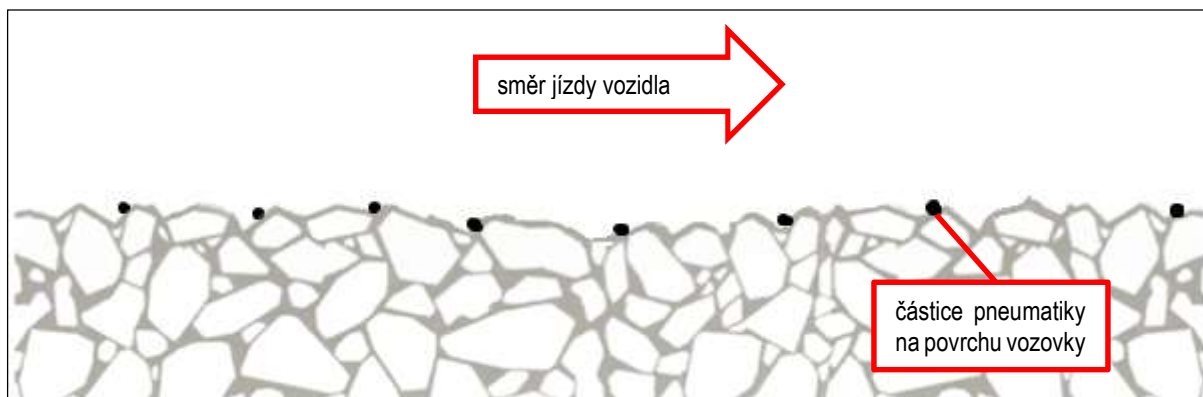
- **Orientační** – zobrazující teritoriální umístění místa dopravní nehody včetně charakteristiky prostředí.
- **Celkové situační** – pro dokumentaci místa dopravní nehody před ohledáním. Obvykle by mělo být vytvořeno několik snímků z různých směrů tak, aby byly zachyceny všechny předměty související s ohledáním a vznikem dopravní nehody, někdy se provádí z vyvýšeného stanoviště.
- **Polodetailní** – pro dokumentaci nejvýznamnějších úseků místa ohledání dopravní nehody, tj. stopy a jejich vzájemnou polohu s okolním prostředím nebo vozidly. Ze snímků musí být jasně zřejmé, ve kterých místech se stopy nebo předměty na místě dopravní nehody nacházely.
- **Detailní** – zobrazují jednotlivé stopy nebo předměty, měly by být pořízeny s přiloženým číslem stopy a s přiloženým fotografickým měřítkem.

⁵⁸ Závazný pokyn policejního prezidenta č. 100/2001 ke kriminalistickotechnické činnosti Policie ČR, Čl. 33

⁵⁹ Nariadenie č. 25/2010 prezidenta Policajného zboru Slovenskej republiky o postupe pri vyhotovovaní, spracovávaní a uchovávaní digitálnych obrazových záznamov na účely trestného konania. Čl. 17

- **Celkové přehledné** – tyto snímky se pořizují až po ohledání místa dopravní nehody a po označení jednotlivých stop nebo předmětů čísly. Na snímcích by mělo být zachyceno rozmístění všech stop a předmětů s fotografickými čísly na místě dopravní nehody. Snímky se pořizují obvykle ze stejných nebo obdobných míst jako se pořizují celkové situační snímky.

Z hlediska stop pneumatik na vozovce má pak zásadní vliv zejména směr a úhel snímání fotoaparátu vůči stopám na vozovce, kdy je obecně doporučeno pořizovat dokumentaci ve směru jízdy brzdícího vozidla, z důvodu způsobu ulpívání částic pneumatik na vozovce, **obr. 31**.



Obr. 31: Částice pneumatiky na povrchu vozovky⁶⁰

Standardně používaným přístrojem policíí je digitální zrcadlovka s rozlišením přibližně 12 MPix s výměnným objektivem, například Canon EOS 450D, viz **obr. 32**. Základní dodávaný objektiv má ohniskovou vzdálenost 18–55 mm, citlivost ISO zrcadlovky je v rozmezí 100 až 1600.



Obr. 32: Digitální zrcadlovka Canon EOS 450D se základním objektivem⁶¹

V případě pořizování fotodokumentace za snížené viditelnosti (šera, noci, mlhy, sněžení atd.) je zapotřebí zajistit dostatečné osvětlení dokumentované oblasti. Také je nutné správně nastavit parametry, tj. čas expozice a velikost clony, citlivost fotoaparátu (tzv. ISO), popřípadě další nastavení.

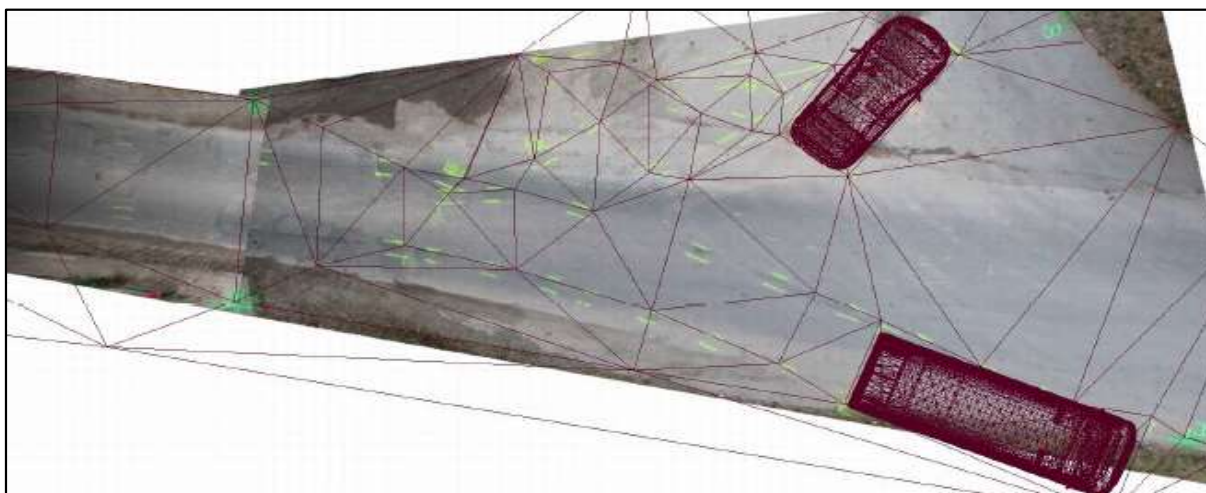
⁶⁰ archiv autora

⁶¹ www.fotoradce.cz/recenze-canon-eos-450d

Rektifikace stop pomocí fotogrammetrie

Principem digitální rektifikace snímků je transformace šikmo dokumentované plochy vozovky místa dopravní nehody na rovinný obrázek v půdorysu, který je relativně přesný a umožňuje v konkrétním měřítku zobrazit veškeré informace obsažené na snímku, tj. stopy, polohy vozidel atd., a vytvořit tak plánec místa dopravní nehody. Při fotodokumentaci je zapotřebí použít tzv. rektifikační kříž⁶², případně je nutné tento nahradit čtyřmi body a změřením vzdálenosti mezi nimi (tj. délky čtyř stran a alespoň jedné z úhlopříček). Nespornou výhodou této metody je dodatečná možnost odměření vzdáleností nebo délek stop přímo na rektifikovaném snímku. Z rektifikovaného snímku je možné určit rovněž poloměr trajektorie stop, což může posloužit pro výpočet mezní rychlosti a tvar stop obecně. U zakřivených a jinak tvarově náročných stop je totiž jejich přesné zaměření velmi pracné a časově náročné.

Přestože je tato metoda již poměrně dlouhou dobu známa, není složkami policie v současnosti ve větší míře využívána. V rámci policie Jihomoravského kraje se začalo s jejím využíváním v průběhu roku 2015 po zprovoznění novějších verzí softwaru. Ne všichni zpracovatelé dopravních nehod však tuto metodu v potřebném rozsahu ovládají, přesto jsou k dispozici první pozitivní výsledky a díky tomu má policie Jihomoravského kraje určitý náskok oproti ostatním krajům a lze předpokládat postupný nástup této metody v praxi. Ukázka rektifikovaných snímků místa dopravní nehody je vyobrazena na **obr. 33**.⁶³



Obr. 33: Porovnání místa dopravní nehody zaměřeného pomocí totální geodetické stanice (síťový model) s provedenou rektifikací snímků (včetně vyznačených brzdných a smykových stop)⁶⁴

⁶² BURG, H., MOSER, A.: Handbuch Verkehrsunfallrekonstruktion: Unfallaufnahme, Fahrdynamik, Simulation

⁶³ TOKAŘ, S.; STÁŇA, I.; BILÍK, M. Porovnání možností zaměření místa dopravní nehody, ExFOS 2016

⁶⁴ STÁŇA, I.; TOKAŘ, S.; BUCSUHÁZY, K.; BILÍK, M. Comparison of Utilization of Conventional and Advanced Methods for Traffic Accidents Scene Documentation in the Czech Republic

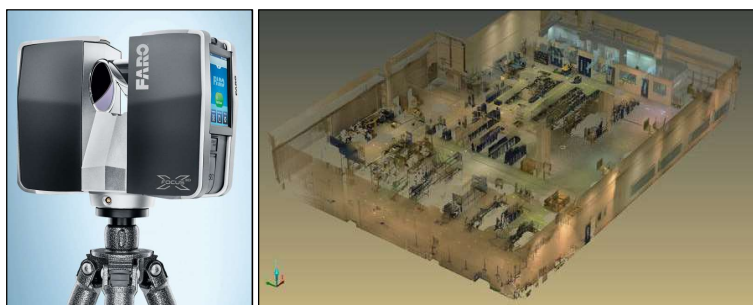
2.6.3 Využití 3D skenerů a dronů

Jasným trendem posledních let je nástup pokročilých dokumentačních metod míst dopravních nehod, jejichž cílem je získat co největší množství co možná nejpresnějších dat. Nevýhodou však mohou být poměrně vysoké vstupní náklady na pořízení dokumentačního vybavení a také náročnost na vytvoření a zpracování 3D modelů.

3D skenery jsou zařízení, která dokáží zachytit a zaznamenat tvary a v případě použití optických 3D skenerů také textury dokumentovaných objektů a následně je převést do digitální podoby pro další zpracování v počítači. Princip metody snímání je založený na snímání polohy jednotlivých bodů na povrchu objektu a vytvoření tzv. mračka bodů. Získané mračno bodů je následně použitím vhodné polygonové sítě extrapolováno na prostorový počítačový model. K získání jednotlivých bodů se využívá mnoho různých technologií: kamery, rentgeny, magnetické mikrotomografy, lasery, dotykové snímače atd., dle technologií se pak i nazývají jednotlivé metody skenování. Z hlediska využitelnosti v oblasti dokumentace místa dopravní nehody je možné uvažovat využití bezkontaktních laserových a optických skenerů.

Bezkontaktní laserové skenery

Laserové skenery lze využít pro skenování rozlehlých objektů, kdy jejich využití je rychlejší než v případě vytvoření shodného modelu pomocí totální stanice nebo výpočtem ze snímků pořízených pomocí fotoaparátu či kamery. Laserové skenery měří vzdálenost od snímače po nejbližší povrch s přesností v řádu milimetrů s rychlostí od tisíců po stovky tisíc naměřených bodů za sekundu. U laserových skenerů s rotujícím zrcadlem systém pracuje na bázi vyzařování bodového laserového paprsku. Paprsek dopadá na otáčející se kosé zrcadlo, které jej láme pod úhlem 90 °, tím je zajištěno skenování prostoru ve vertikálním směru. Pro zajištění skenování v horizontálním směru se celý skener otáčí na podstavci kolem vlastní svislé osy. Měřicí rozsah je obvykle 360 ° vertikálně a až 330 ° horizontálně, účinný dosah je pak v řádově i stovky metrů.⁶⁵



Obr. 34: Laserový 3D skener FARO Focus3D-X130; zpracování dat v softwaru Faro Reality⁶⁶

⁶⁵ www.faro.com/en-gb/products/construction-bim-cim/faro-focus/

⁶⁶ www.merici-pristroje.cz/faro-focus3d-x130-laser-scanner/

Skenování z jedné pozice však nemůže zaznamenat všechny potřebné informace, proto musí být měření opakováno na několika různých místech. Obvykle je ve skeneru také implementován fotoaparát nebo digitální kamera k zachycení obrazu daného prostředí, který je možné dále spojit s naměřenými daty, pro zjednodušení procesu modelování a získání informace o barvě skenovaného povrchu. Obvykle tak výsledkem skenu jednoho místa dopravní nehody je mračno bodů čítající několik desítek i stovek milionů jednotlivých bodů, které je nutné dále zpracovat. Zpracování takového objemu dat pak může být poměrně náročné na výpočetní techniku.

Výsledkem a výhodou této metody je detailní 3D model místa dopravní nehody, ze kterého je možné při dostatečné přesnosti rozlišit například dřecí a rycí stopy či oblasti střepin apod. V případě dokumentace textury povrchu je pak možné v modelu identifikovat také smykové a blokovací stopy pneumatik. Nevýhodou pak je poměrně vysoká investice v řádu několika set tisíců až milionů korun a také vysoké výpočetní nároky na zpracování výstupů.



Obr. 35: Použití 3D skenu místa dopravní nehody v simulačním programu PC Crash⁶⁷

Optické skenery

Optické skenery jsou založeny na principu triangulace, k čemuž využívají stereoefektu dvou snímacích digitálních kamer s vysokým rozlišením. Na skenovaný 3D objekt je projektována sekvence periodických pruhů a poté jsou kamerami snímány výsledné vzory pruhů. Využitím metody geometrické triangulace, podle počtu změn ve struktuře projektovaného vzoru světla vycházejícího z geometrie objektu, lze získat 3D informaci z 2D snímků. Využitím této metody lze jediným snímkem získat data obsahující několik milionů 3D souřadnic. K získávání kompletního 3D

⁶⁷ manuál PC crash 10.1

modelu je i v tomto případě nutné snímání z více pohledů. Při nižších nárocích na přesnost jsou optické skenery výrazně rychlejší v porovnání se skenery laserovými. Další výhodou může být konstrukční řešení, kdy optické skenery jsou velmi často koncipovány jako ruční, čímž je definována oblast zájmu již při získávání dat.



Obr. 36: Ruční optický skener GO!SCAN 3D⁶⁸

Použití dronů

Využití dronů (dálkově ovládaných bezpilotních prostředků) je jedním z trendů vstupujících do oblasti dokumentace míst silničních dopravních nehod, primárním důvodem používání je rychlost dokumentace místa dopravní nehody a v případě vyspělejších modelů také nezávislost na lidském faktoru – obsluha pouze zadá oblast zájmu a dron v autonomním režimu následně provede dokumentaci tohoto místa. Výstupem může být detailní ortofotomapa, případně 3D model místa dopravní nehody ve formě mračna bodů, který je obvykle vytvořen z několika stovek snímků vestavěné kamery dronu.



Obr. 37: Dron Aeryon SkyRanger a ukázka možnosti dokumentace místa dopravní nehody⁶⁹

⁶⁸ <https://www.creaform3d.com/en/metrology-solutions/handheld-portable-3d-scanner-goscan-3d>

⁶⁹ www.aeryon.com/aeryon-skyranger

S využitím dronu je tedy možné na místě dopravní nehody velmi rychle a také přesně zadokumentovat konečné polohy vozidel a účastníků nehody, případně dobře viditelné stopy kapalin či úlomky vozidel. V pohledu slabě zřetelných brzdných stop vozidel, je využití dronu srovnatelné s využitím fotoaparátů či kamer, přičemž nejnovější modely jsou i velikostně odpovídající, viz **obr. 38**.



Obr. 38: Dron DJI Spark s automatickou stabilizací i vyhýbáním se překážkám⁷⁰

2.7 EXPERIMENTÁLNÍ METODY DETEKCE NEZŘETELNÝCH STOP PNEUMATIK

2.7.1 Použití termokamery⁷¹

Ing. Vlastimil Rábek, Ph.D. ve své dizertační práci použil pro detekci nezřetelných stop na vozovce termovizní kameru pro vzdálenou oblast infračerveného spektra (LWIR, $8 - 12 \text{ nm}$ - long wave infra red), konkrétně nechlazenou termovizní kameru řady PalmIR. Pomocí této získal přímý (černobílý) teplotní obraz typu FLIR i termografický obraz v nepravých barvách zkoumaného povrchu. Cílem provedených zkoušek bylo ověření použitelnosti termokamery pro detekci nezřetelných brzdných stop; detekci konečné polohy vozidla po dopravní nehodě (v případě přemístění či odstavení vozidla); detekci konečné polohy ležící osoby po dopravní nehodě.

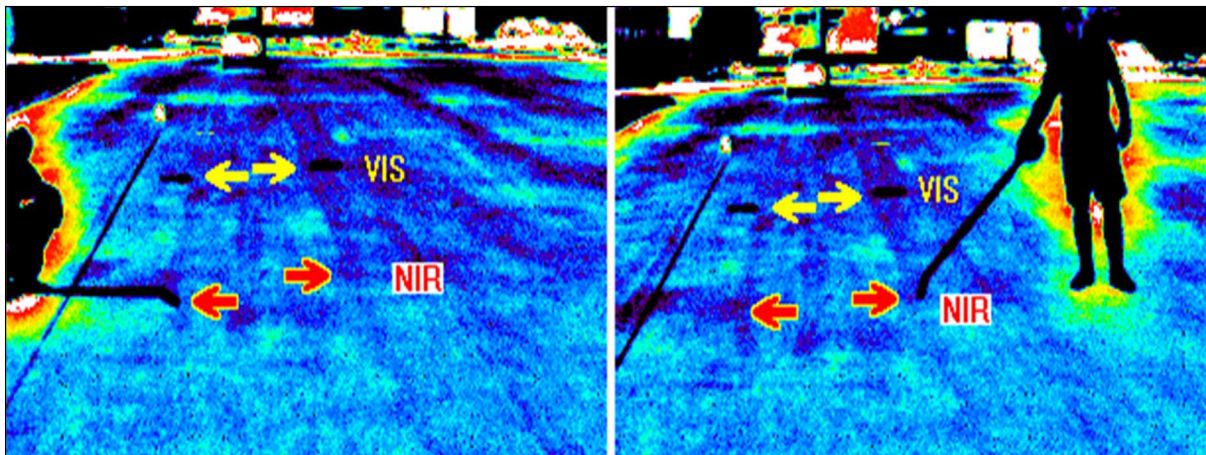
Při provedených měřeních bylo potvrzeno, že při intenzivním brzdění vozidla vznikl po dobu cca 15 sekund na suché vozovce velmi intenzivní detekovatelný tepelný účinek. Vzniklé tepelné pole však bylo možné s použitou technikou detekovat pouze do cca 30 minut. Vzniklé teplo souvisí s přeměnou části kinetické energie vozidla na teplo. Mimo toto vzniklé teplo byla vozovka ovlivněna pro infračervenou detekci nanesením mikrootěrů pneumatiky, které měnily vlastnosti povrchu vozovky a tato místa vykazovala jiné absorpční a emisní vlastnosti než okolí.

Velmi dobrých výsledků bylo dosaženo při parném (horkém) počasí, kdy získá optické informace (na **obr. 39** označené popiskem NIR) pomocí termovizní kamery byl o cca 20 % větší, a to

⁷⁰ www.dji.com

⁷¹ RÁBEK, V.: Optické metody detekce nezřetelných stop na vozovce při znalecké analýze silničních nehod

na asfaltovém i betonovém krytu vozovky, než tomu bylo okem pozorovatele (na **obr. 39** označené popiskem VIS), tj. část brzdné stopy vozidla byla lidským okem rozpoznatelná a identifikovatelná.



Obr. 39: Termografické snímky brzdné dráhy vozidla s časovým odstupem 30 minut z měření provedeného Ing. Vlastimilem Rábekem, Ph.D.⁷²

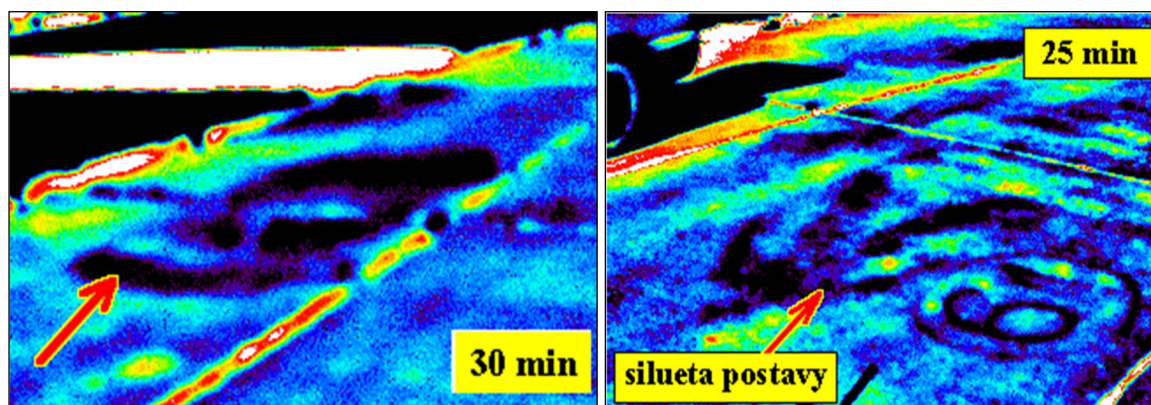
Při měřeních za relativně nižších teplot (cca 14–20 °C) bylo zjištěno, že získání informace pozorování termovizní kamerou byl vyšší u lidským okem méně zřetelných (ale viditelných) stop než u okem jasně viditelných stop, kde došlo k masivnímu odběru materiálu z běhounu pneumatiky vozidla.

Na mokré vozovce byla zjištěna nemožnost detekce jakýchkoliv stop termovizní kamerou. Po oschnutí vozovky byla jedna ze zanechaných stop pomocí termovizní kamery pozorovatelná, ale stejného výsledku pozorování bylo dosaženo i při ohledání vozovky lidským zrakem.

Z hlediska detekce nezřetelných brzdných stop dospěl Ing. Vlastimil Rábek, Ph.D. k závěru, že použití termovizní kamery pro detekci nezřetelných brzdných stop může přinést výrazný zisk optické informace jen za určitých povětrnostních podmínek – při chladnějším počasí, byl termografický zisk přídavné informace o nezřetelných brzdných stopách velmi slabý.

Současně s měřením brzdných stop Ing. Vlastimil Rábek, Ph.D. zkoumal možnosti detekce konečné polohy vozidla, které bylo z této polohy odstaveno. Na základě provedených měření pak zjistil, že konečnou polohu vozidla bylo možné detekovat dle tepelných stop, které na vozovce odstavené vozidlo zanechalo až do cca 45 minut po jeho odstavení. Dle podmínek bylo možno pozorovat celkový půdorys (siluetu) vozidla, otisk tepelného vyzařování motoru, otisk výfukového potrubí a zejména tepelný otisk pneumatik.

⁷² RÁBEK, V.: Optické metody detekce nezřetelných stop na vozovce při znalecké analýze silničních nehod



Obr. 40: Termografický snímek tepelného otisku vozidla a ležící osoby⁷³

Tepelné pole po přítomnosti pneumatik na vozovce, bylo pozorovatelné až do cca 45 minut po odstavení vozidla, přičemž výsledek pozorování nebyl silně závislý na okolních jevech kvůli přímému kontaktu pneumatik s vozovkou.

Možnosti použití termovizní kamery pro ověření konečné polohy vozidla po nehodě se ukázaly na suché vozovce jako zcela reálné, přičemž při parném počasí dominovalo tepelné pole vznikající jako následek stínu celého vozidla a při relativně chladnějším počasí dominoval tepelný otisk pneumatik.

2.7.2 Identifikace pneumatik s využitím pyrolýzy

Možností identifikace pro lidské oko nezřetelných brzdných stop, je i chemická analýza otěrů běhounu pneumatiky na povrchu vozovky. Touto metodou se zabýval již v roce 2004 G. Sarkissian⁷⁴ a jeho tým, kteří provedli odběr 59 vzorků z pneumatik vozidel zúčastněných při dopravních nehodách. Tyto vzorky analyzovali a porovnali se vzorky pneumatik odebraných z vozovky na místech dopravních nehod. Úspěšnost přiřazení jednotlivých vzorků k jednotlivým výrobcům během provedených experimentů byla 95 %, z hlediska vyšetřování dopravních nehod je tato metoda vhodná pro zjištění pneumatik např. neznámého vozidla, které odjelo z místa dopravní nehody.

Obdobným výzkumem se zabývali ve svých člancích L. Gueissaz a G. Massonet^{75, 76}, kteří využili pyrolýzu v kombinaci s plynovou chromatografií a hmotnostní spektrometrií pro přiřazení odebraného vzorku brzdné stopy ke konkrétní pneumatice. Odběr otěrů běhounu pneumatik

⁷³ RÁBEK, V.: Optické metody detekce nezřetelných stop na vozovce při znalecké analýze silničních nehod

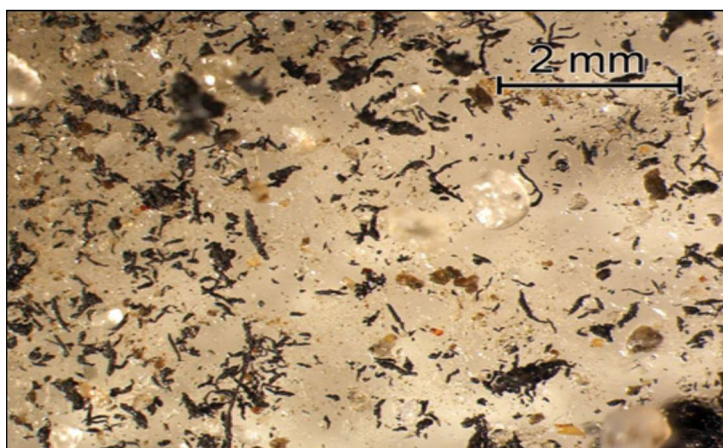
⁷⁴ SARKISSIAN, G., KEEGAN, J., DU PASQUIER, E., DEPRIESTER J.-P., ROOUSSELOT, P.: The Analysis of Tires and Tire Traces using FTIR and Py-GC/MS, Canadian Society of Forensic Science Journal

⁷⁵ GUEISSAZ, L., MASSONNET, G.: Tire traces - discrimination and classification of pyrolysis-GC/MS profiles. Forensic science international [online]

⁷⁶ GUEISSAZ, L., MASSONNET, G.: Chemical Analysis of Tire Traces in Traffic Accidents Investig. J Forensic Sci Med 2015

z vozovky byl proveden pomocí daktyloskopické fólie, ze které byly následně pinzetou odebrány částice pro rozbor, tato metody byla úspěšně otestována na 10 a 12 vzorcích pneumatik osobních vozidel různých výrobců, kdy jednotlivé vzorky byly správně přiřazeny ke svým původcům při tzv. slepém testu. Autoři se však nezabývali délkami ani tvarem brzdných stop. Povrch, na kterém probíhalo testování, byl pro měření důkladně vyčištěn, což nelze považovat za situaci odpovídající obvyklým podmínkám na místě dopravní nehody.

Souběžně se identifikací pneumatik zabýval také T. Lachowicz a kol.^{77, 78}, kteří rovněž rozvíjeli metodu odběru vzorků pneumatik z brzdných stop a jejich následné přiřazení k výrobci a typu pneumatiky. Svá měření provedli na 42 vzorcích, a to jak letních, tak zimních i celoročních pneumatik osobních vozidel. Odběr vzorků z brzdných stop prováděli pomocí daktyloskopických pásek, viz **obr. 41**, na počátku, středu a viditelném konci brzdných stop s cílem zjistit vliv brzdění na složení/ovlivnění zkoumaného vzorku.



Obr. 41: Ukázka částic pneumatiky na daktyloskopické pásce ⁷⁹

Z tohoto pohledu zjistili, že v průběhu brzdění je chemické složení zanechaných částic pneumatiky konstantní a neměnné. Výsledkem bylo opět přiřazení odebraného vzorku z „viditelné“ části brzdné stopy k pneumatice, kterou byla tato stopa vytvořena. Jako jasnou nevýhodu však autoři popsali nutnost odběru množství vzorků a jejich následný transport do laboratoře k rozboru.

Pozitivním výsledkem všech výše popsaných metod je potvrzení možnosti chemické identifikace částic pneumatik, toto prokazuje mj. i množství publikací zabývajících se detekcí částic pneumatik v životním prostředí. Jako identifikátor byla ve všech případech zvolena organická forma

⁷⁷ LACHOWICZ, T., ZIĘBA-PALUS, J., KOŚCIELNIAK, P.: Chromatographic Analysis of Tire Rubber Samples as the Basis of Their Differentiation and Classification for Forensic Purposes. Analytical Letters [online]

⁷⁸ LACHOWICZ, T., ZIĘBA-PALUS, J., KOŚCIELNIAK, P.: Pyrolysis Gas Chromatography - Mass Spectrometry for the Characterization of Tire Marks for Forensic Analysis. Analytical Letters [online]

⁷⁹ LACHOWICZ, T., ZIĘBA-PALUS, J., KOŚCIELNIAK, P.: Pyrolysis Gas Chromatography - Mass Spectrometry for the Characterization of Tire Marks for Forensic Analysis. Analytical Letters [online]

zinku, která je v rámci různých sloučenin při výrobě přidávána do pneumatik. Nejčastějšími analytickými metodami použitými pro identifikaci a kvantifikaci zinku byly atomová absorpční spektroskopie (AAS), hmotnostní spektrometrie indukčně vázaného plazmatu (ICP-MS), elektronová mikrosonda (EP) a neutronová aktivační analýza (NA).

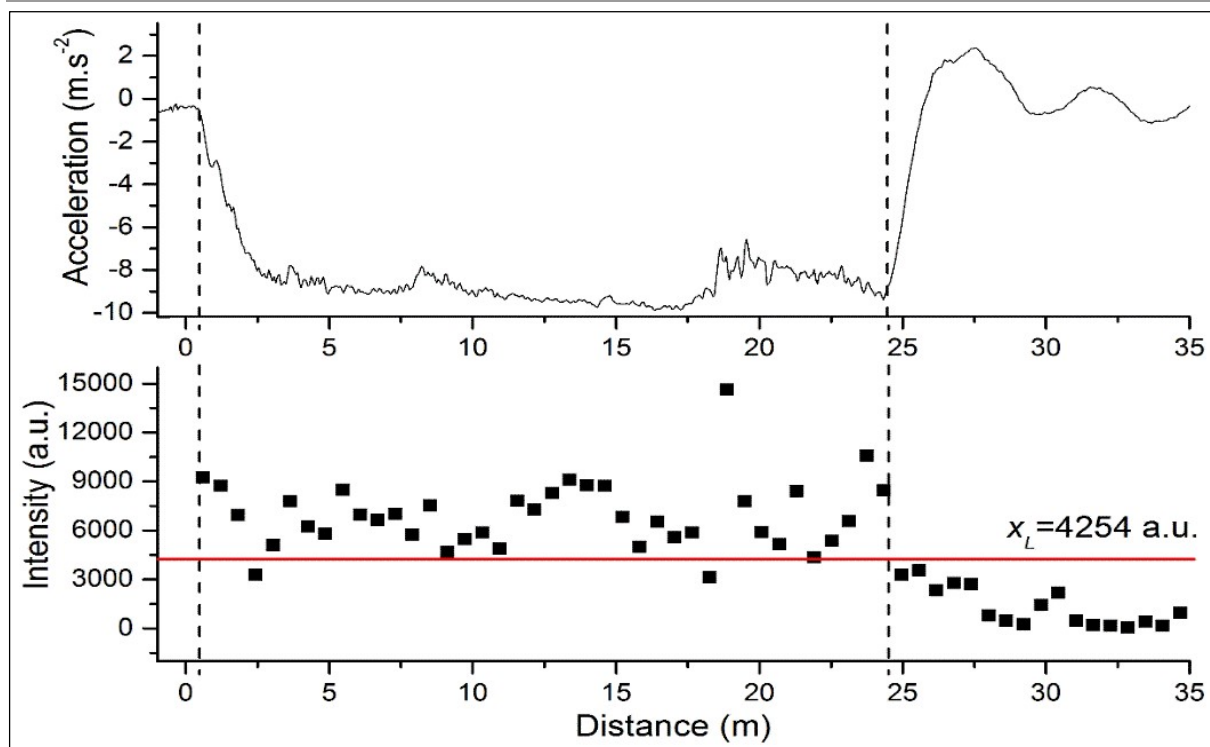
Společnou nevýhodou všech výše popsaných metod je nutnost odběru a přípravy vzorků a jejich následný transport do laboratoře k rozboru, s čímž je spojena také určitá časová a logistická náročnost. Pro praktické využití metod identifikace částí pneumatik je nezbytné, aby tyto mohly být prováděny a vyhodnocovány dokumentujícími osobami přímo na místě dopravní nehody. Určitým pokrokem v této oblasti je práce Ing. Davida Procházky, Ph.D.⁸⁰, který navrhl pro identifikaci částic běhounu pneumatiky využití spektroskopie laserem buzeného plazmatu (LIBS).

Na základě chemického složení pneumatik byl jako vhodný prvek pro identifikaci pneumatiky zvolen opět zinek. Z emisních LIBS spekter pneumatik byla určena vhodná spektrální čára neinterferující s žádnou spektrální čarou prvku potenciálně se vyskytujícího v nosiči, v případě přenosu pomocí adhezní pásky. Jako v podstatě jediná vhodná byla vybrána spektrální čára na vlnové délce 330,25 nm.

V rámci práce bylo provedeno přímé měření povrchu vozovky pomocí mobilní aparatury (rLIBS). Pro všechny varianty měření byla provedena optimalizace parametrů měření na základě podmínky maximálního poměru signálu k šumu.

Pro ověření potenciálu metody byla vytvořena brzdná stopa pomocí vozidla vybaveného protiblokovacím brzdovým systémem (ABS). Počáteční rychlost vozidla, ze které bylo brzděno, byla 72 km/h. Prahová intenzita spektrální čáry Zn I 330,25 nm, pro kterou bylo možné prohlásit, že jde o signál, byla stanovena pomocí měření povrchu vozovky bez brzdné stopy. Brzdná stopa byla analyzována směrem od konečné pozice vozidla k místu, kde začalo brzdění. V grafech na obrázku **obr. 42** je srovnání intenzity spektrální čáry v závislosti na poloze (dolní graf) s průběhem zpomalení v závislosti na dráze (horní graf). Teplota vzduchu v době experimentu dosahovala hodnoty 32 °C a teplota vozovky 48 °C. Povrch vozovky byl živičný, sklon vozovky byl zanedbatelný.

⁸⁰ PROCHAZKA, D.: Detekce brzdných stop pomocí spektrometrie laserem indukovaného plazmatu (LIBS) a spektrometrie laserem indukované fluorescence (LIBS + LIFS)



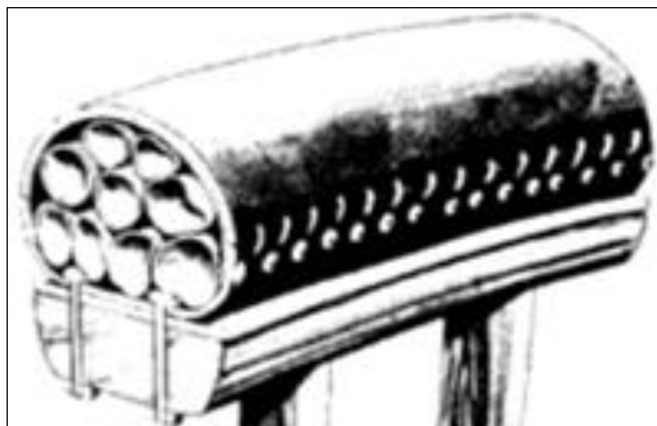
Obr. 42: Porovnání zpomalení vozidla a intenzity spektrální čáry⁸¹

Z grafů je patrné, že předmětná brzdná stopy byla identifikována po celé svojí délce, čímž byla prokázána možnost použití metody LIBS pro identifikaci opticky nezřetelných brzdných stop přímo na vozovce. Pro zavedení metody do praxe je však zapotřebí provést ověření a další experimenty, což je jedním z cílů této práce, a dále vytvořit jednotnou metodiku měření.

2.8 KONSTRUKCE PNEUMATIK

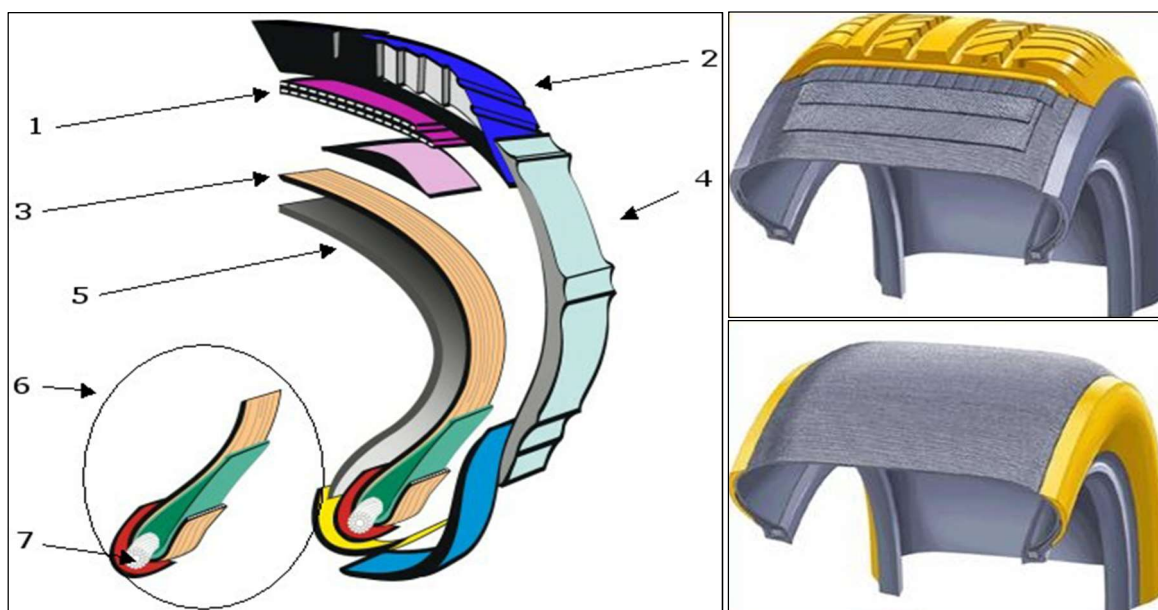
Počátky pneumatik se začaly psát v roce 1845, kdy Robert William Thomson vynalezl pneumatiku a získal první patent – jednalo se o několik pryžových hadic umístěných po okrajích dřevěných loukoťových kol, jak je zobrazeno na **obr. 43**. Svým vynálezem tehdy značně předběhl dobu, protože k rozšíření došlo až o několik desítek let později, kdy s obdobným nápadem přišel Jon Boyd Dunlop.

⁸¹ PROCHAZKA, D., BILIK, M., a kol.: Detection of Visually Unrecognizable Braking Tracks Using Laser-Induced Breakdown Spectroscopy (LIBS). Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy



Obr. 43: Pneumatika patentovaná R. W. Thomsonem v roce 1845⁸²

Pneumatika má zcela mimořádný význam pro přenos sil mezi automobilem a vozovkou. Konstrukce pneumatiky ovlivňuje jízdní vlastnosti, komfort cestování i bezpečnost jízdy. V současnosti vyráběné pneumatiky jsou vlastně vyztužené pryžové kompozity, které jsou složeny ze tří základních komponent: pryž (80 – 85 %), různá vlákna (12 -15 %) a ocelový kord (2 – 3 %), viz **obr. 44**.



Obr. 44: Konstrukce pneumatiky: 1 – korunní kordová vrstva; 2 – běhoun (vpravo nahoře); 3 – radiální kordová vrstva; 4 – bočnice (vpravo dole); 5 – vnitřní gumová vrstva; 6 – patka; 7 – patní lano⁸³

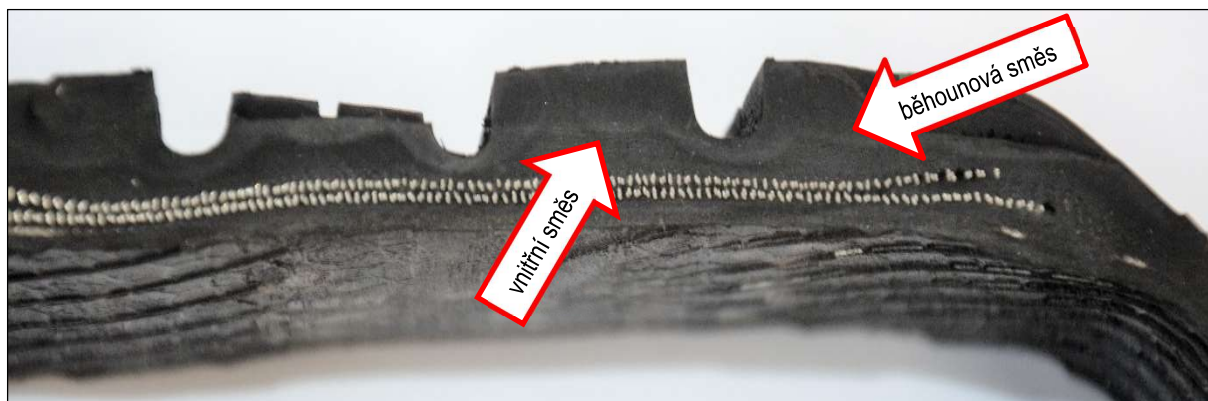
Běhoun je jediným konstrukčním prvkem pneumatiky, který by měl při běžném provozu přijít do kontaktu s vozovkou. Funkcí běhounu je také ochrana spodních vrstev pneumatiky, zvláště kostry, před nepříznivými povětrnostními vlivy, mechanickým poškozením a jinými případnými poškozeními. Vnější strana běhounu je opatřena drážkami a lamelami, které tvoří tzv. dezén pneumatiky. Podélné drážky ovlivňují přenos bočních sil a tím směrovou stabilitu, příčné drážky

⁸² KEJÍKOVÁ, B.: Vliv hloubky dezénové drážky na dosažitelné zpomalení vozidla

⁸³ SAJDL, J.: Konstrukce pneumatiky. Autolexicon.net [online]. [cit. 2017-11-28]

pak ovlivňují přenos hnacích sil na vozovku. Velmi důležitou funkcí dezénu je odvod vody z jízdní stopy vozidla, aby nedocházelo ke vzniku aquaplaningu. Dezén tvoří obvykle 60 až 80 % celkové tloušťky běhounu pneumatik pro osobní vozidla, v případě pneumatik pro nákladní vozidla je podíl menší z důvodu předpokládaného pozdějšího prořezávání vzorku dezénu. V některých případech je v konstrukci pneumatiky využit princip dvojitého běhounu – vrchní vrstva s dezénem je odolná proti opotřebení a spodní vrstva je navržena tak, aby docházelo k nízkým hysterezním ztrátám při zatížení pneumatiky. Z pohledu technologie výroby bývá v drtivé většině případů běhoun vyroben z jedné gumárenské směsi. Pokud je však vyžadováno, může být běhoun vyroben z několika různých směsí (zejména u pneumatik pro závodní účely).⁸⁴

Za určitých podmínek (nejčastěji při nesprávném nahuštění) může dojít ke kontaktu bočnice pneumatiky s vozovkou. Primární funkcí bočnice však je propojení běhounu a patky pneumatiky současně s ochranou bočních částí kostry. Gumárenská směs na výrobu bočnice má obvykle odlišné složení od směsi pro běhoun, viz **obr. 45**, a je tvořena z přírodního kaučuku kvůli odolnosti vůči ohybům.⁸⁴



Obr. 45: Řez pneumatikou osobního vozidla⁸⁵

2.8.1 Složení gumárenských směsí

Každá výrobní gumárenská směs je složena z několika základních surovin, jejichž poměrové složení se odvíjí v závislosti na požadovaných vlastnostech pneumatiky, zpracovatelnosti materiálu a minimalizaci nákladů. Z těchto důvodů si každý výrobce chrání své vlastní přesné proporcionální složení jednotlivých gumárenských směsí. Primární složky tvořící gumárenskou směs jsou kaučuky (přírodní – používané především pro výrobu zimních pneumatik; syntetické – používané pro výrobu letních a celoročních pneumatik) a plniva, dále směs obsahuje vulkanizační činidla, vulkanizační urychlovače, změkčovadla a antidegradanty.

⁸⁴ VLK, F.: Podvozky motorových vozidel. 2. vyd.

⁸⁵ archiv autora

Přírodní kaučuk

Přírodní kaučuk NR (Natural Rubber) je obsažen ve 30 % mléčně bílé zbarvené mízy kaučukovníku obecně známé jako latex. Z této látky se kaučuk získává odpařením vody, vymražením nebo vysrážením pomocí kyseliny (nejčastěji mravenčí nebo octové). Takto získaný kaučuk se dále zpracovává například válcováním na 2 až 3 mm silné fólie, které se následně suší pomocí horkého kouře, čímž vzniká tzv. RSS kaučuk (Ribbed Smoked Sheet).

Přírodní kaučuk má v důsledku vysoké molekulové hmotnosti vysokou viskozitu a před dalším zpracováním musí být provedena plastikace (mechanické odbourání vazeb), po které má kaučuk dobrou pevnost před vulkanizací, vysokou konfekční lepivost a rychlost vulkanizace.

Vulkanizáty z přírodního kaučuku mají vysokou mechanickou pevnost a velmi dobrou odolnost vůči oděru, proto jsou vhodné na výrobu pneumatik a pružin vibračních uložení.⁸⁶

Syntetické kaučuky⁸⁷

Pro výrobu pneumatik se také používají syntetické kaučuky, které jsou určeny k všeobecnému použití. Jejich výhodou je velmi dobrá odolnost vůči otěru, vysoká pevnost a pružnost. Nevýhodou je jejich slabá odolnost proti stárnutí, toto je však možné eliminovat přidáním antidegradantů do výrobní směsi. Nejpoužívanější druhy syntetických kaučuků jsou:

- Butadienstyrenový (SBR) je nejvíce používán pro výrobu běhounových směsí;
- Butadienový (BR) je samostatně obtížně zpracovatelný, proto se používá v kombinaci s kaučuky NR a SBR, kdy zlepšuje fyzikálně-mechanické vlastnosti běhounové směsi;
- Izoprenový (IR) je možné použít do všech částí pláště obvykle v kombinaci s NR;
- Butylkaučuk (IIR) má velmi nízkou propustnost pro plyny, nepoužívá se ale pro výrobu běhounů, protože se nespojuje s jinými druhy, využívá se pro výrobu membrán, lisování plášťů a výrobků z technické pryže.

Komponenty kaučukových směsí

- *Vulkanizační činidla* jsou látky podporující chemickou reakci, kdy při teplotě 140 ° - 210 °C vznikají příčné vazby mezi řetězci kaučukového uhlovodíku. Nejčastěji používaná vulkanizační činidla jsou síra, oxidy kovů a reaktivní pryskyřice.
- *Urychlovače* podporují činnost vulkanizačních činidel – rozdělují se podle rychlosti reakce na pomalé, rychlé, velmi rychlé, ultrarychlé a speciální. Z často používaných lze uvést například Vulkacit MOZ a Sulfenax.

⁸⁶ MALÁČ J.: Gumárenská technologie – 2. Kaučuky [online]

⁸⁷ Kolektiv autorů: Gumárenská technologie, učební texty Barum Continental spol. s r. o., 2008

- Aktivátory slouží ke zvýšení účinku vulkanizačních činidel. Nejpoužívanější je zinková běloba a Stearin.
- Retardéry naopak zpomalují nástup vulkanizace při teplotách do 120 °C, čímž umožňují lepší zpracovatelnost směsí a zvyšují produktivitu. Používá se například Vulkalet G a Duslin.
- Změkčovadla usnadňují zpracovatelnost směsí, snižují tuhost a zvyšují lepivost. Nejčastěji jsou používány parafin, ropné oleje, asfalty, dehty, kalafuna a smrkový dehet.
- Plniva ztužující zlepšují pevnost, pružnost, tvrdost a odolnost proti opotřebení. Nejčastěji se používají saze (C₄) a Silika (SiO₂).
- Plniva neztužující zvětšují objem a zlevňují finální výrobek. Používají se křída, kaolin, vápenec.
- Antidegradanty, Antioxidanty, Antiozonanty zabraňují předčasnému stárnutí pryže vlivem působení kyslíku, ozónu, světla a dynamického namáhání. Používá se například Santoxlex IP.
- Plastikační činidla zkracují dobu plastikace a odbourávají tuhost kaučuku. Nejpoužívanější jsou Peptazin a Renacit.
- Regenerát nahrazuje z části kaučuk, používá se do méně kvalitních směsí, vyrábí se regenerací staré pryže.
- Další přísady: nadouvadla, faktisy, pigmenty a barviva.

Podíly složek v gumárenské směsi jsou obvykle určovány jako poměrné díly ke sto dílům kaučuku (dsk), který je (v různých formách) základem každé gumárenské směsi, viz **tab. 1**.

Tab. 1: Receptura směsí pro nákladní pneumatiky⁸⁸

Komponenta	Běhoun [dsk]	Kostrá [dsk]
Přírodní kaučuk	70	40
Izoprenový kaučuk	10	30
Butadienový kaučuk	20	---
Butadienový kaučuk nastavený olejem	---	30
Oxid zinečnatý	3 – 4	3 – 4
Kyselina stearová	2	5
Saze retortové	50	30
Změkčovadlo	6	4
Urychlovač	0,9	0,9
Síra	1,8	2,6 – 3,0
Antioxidant	1,0	1,6
Retardér	0,2	---

⁸⁸ VAŠÍČEK, E.: Gumárenské směsi, <http://slideplayer.cz/slide/3762754>

2.8.2 Chemické složení běhounů pneumatik

V rámci projektu mezifakultního specifického výzkumu Databáze chemického složení pneumatik vozidel v ČR (autor této práce byl spoluřešitelem projektu) byl proveden chemický rozbor několika vzorků běhounů pneumatik vyrobených značkami koncernů Continental, Michelin a Goodyear. U vzorků továrně nových, tj. nepoužitých, pneumatik bylo zastoupeno 18 vzorků od nejnižší po nejvyšší cenovou třídu. V kategorii použitých a používaných pneumatik byly zastoupeny vzorky 10 pneumatik stáří 1 až 5 let. Chemický rozbor byl proveden pomocí rentgenové fluorescenční spektroskopie (XRF) a emisní spektrometrie s indukčně vázaným plazmatem (ICP-OES). Pro samotnou chemickou analýzu byla použita pouze vrchní vrstva běhounu pneumatiky bez nylonu a ocelových součástí.

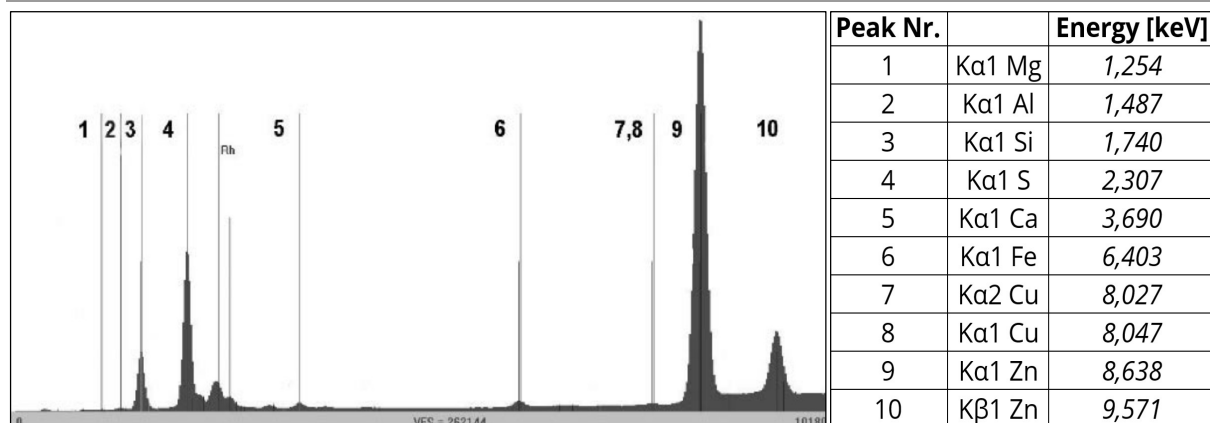
Fluorescenční spektroskopie

XRF spektrometry se používají pro identifikaci prvků obsažených ve zkoumané látce a k určení množství těchto prvků, tj. pro určení elementárního chemického složení zkoumaného materiálu. Prvek je identifikován jeho charakteristickou emisí záření, vlnovou délkou (λ) nebo energií (E). Množství prvků je určeno měřením intenzity jeho charakteristické vlnové energie.

Atomy téhož prvku mají stálý počet elektronů uspořádaných v orbitech okolo jádra. XRF spektrometrie typicky využívá aktivitu v prvních třech elektronových orbitech K, L a M, kdy každý elektronový orbit odpovídá specifické a unikátní energetické úrovni pro daný prvek. V XRF spektrometrii emitovaný vysoce energetický primární foton rentgenového záření „narazí“ do vzorku. Energie narážejícího fotonu je dostatečná k vyrazení elektronu ven z nevnitřnějších orbitů K nebo L. Absentující elektron v orbitu je doplněn přeskokem elektronu z vyššího orbitu. Dochází tak energetickému rozdílu, který je vyzářen jako fluorescenční rentgenové záření, které je charakteristické pro specifické prvky. Energie (E) emitovaného fotonu rentgenového záření je určena rozdílem energií mezi počátečním a finálním orbitem jednotlivého přechodu.⁸⁹

Analýza chemického složení jednotlivých vzorků probíhala ve vakuu po dobu 5 minut při proudu 450 μA a napětí 20 kV. Ukázka získaného chemického spektra běhounu pneumatiky je patrná na **obr. 46**.

⁸⁹ Rentgenové spektrometry ED-XRF <https://www.bas.cz/rentgenove-spektrometry/xrf-rentgenove-spektrometry.php>



Obr. 46: Ukázka získaného XRF spektra běhounu pneumatiky⁹⁰

Spektrometrie s indukčně vázaným plazmatem

ICP – OES je analytická metoda, která umožňuje stanovení obsahu stopových i významných koncentrací jednotlivých prvků v analyzovaném vzorku materiálu. Pomocí této metody je možné analyzovat prvky, které je možno převést do roztoku. Citlivost této metody je od jednotek ppm.

Při analýze ICP – OES byl 1 g vzorku běhounu zkoumané pneumatiky rozpuštěn ve 30 ml kyseliny dusičné. Tento roztok byl umístěn na topnou desku a byl zahříván po dobu 5 hodin na teplotu 80 °C. Vzniklá suspenze byla odfiltrována a doplněna ultra čistou vodou. Uhlíkaté částice zachycené pomocí filtru byly vysušeny a zváženy, čímž bylo zjištěno množství uhlíkového zbytku.

Pomocí dvou výše uvedených metod byly zjištěny prvky vyskytující se ve směsích běhounů pneumatik. Z významně zastoupených prvků lze uvést například Al, Ba, Cr, Cu, Fe, Mg, Mn, Ni, P, Si, Ti a Zn, který byl z těchto prvků zastoupen v nejvýznamnějším množství, viz **tab. 2**, ve které je provedeno porovnání významně zastoupených prvků v běhounu továrně nové a použité pneumatiky.

Tab. 2: Množství prvků ve vzorku pneumatiky⁹¹

prvek	nová pneumatika [mg/g]	použitá pneumatiky [mg/g]
Al	1,361	1,332
Ba	0,025	0,025
Cr	0,001	0,001
Cu	0,006	0,004
Fe	0,107	0,083
Mg	0,329	0,262

⁹⁰ DIVIŠ, P.; SOLNÝ, T.; PTÁČEK, P.; ADAMEC, V.; BILÍK, M.; BRADÁČ, A.; SCHÜLLEROVÁ, B.: Analysis of tire composition for further detection of tire marks on the road. Czech Chemical Society Symposium Series, 2015

⁹¹ DIVIŠ, P.; SOLNÝ, T.; PTÁČEK, P.; ADAMEC, V.; BILÍK, M.; BRADÁČ, A.; SCHÜLLEROVÁ, B.: Analysis of tire composition for further detection of tire marks on the road. Czech Chemical Society Symposium Series, 2015

prvek	nová pneumatika [mg/g]	použitá pneumatiky [mg/g]
Mn	0,003	0,002
Ni	0,006	0,007
P	0,031	0,022
Si	0,653	0,310
Ti	0,011	0,008
Zn	16,692	3,947

Dle výše uvedených rozborů se jako optimální prvek pro detekci stopy pneumatiky na vozovce jeví zinek, který je poměrně výrazně zastoupen v běhounové směsi pneumatiky a zároveň není obsažen ve směsi ze které je zhotoven kryt vozovky.

2.9 DEGRADACE STOP PNEUMATIK NA VOZOVCE

Významným faktorem ovlivňujícím jak samotnou možnost, tak i kvalitu záznamu brzdné či smykové stopy vozidla je degradace této stopy. Degradaci stopy není možné zabránit, existují však situace a faktory, které degradaci významným způsobem urychlují. Degradace stopy pneumatiky na vozovce může vzniknout už při samotném nehodovém ději, kdy může dojít k překrytí stopy pneumatiky na vozovce například provozními kapalinami uniklými z vozidla po střetu, viz **obr. 47**. Toto překrytí stopy s sebou obvykle nese i další překrytí, a to posypem sorbentu s následným zametením. Tímto způsobem se jakákoliv stopa pneumatiky překrytá uvedeným způsobem stává prakticky nedetekovatelnou pomocí současných metod.



Obr. 47: Stopy pneumatik osobního vozidla a motocyklu překryté únikem provozních kapalin a posypem sorbentu⁹²

⁹² archiv ÚSI VUT v Brně

Velmi často je stopa pneumatiky na vozovce degradována vlivem atmosférických podmínek v místě dopravní nehody, tj. například odfouknutí částic pneumatiky vlivem větru, či jejich odplavení vlivem deště. Z pohledu možnosti detekce pomocí termokamery, pak při větru dochází k rychlejšímu chladnutí stopy.

K mechanické degradaci dochází obvykle vlivem provozu v místě DN, tj. „rozježdění“ stopy pneumatiky dalšími vozidly po jejím okolí. Pokud se stopa nachází v prostoru, kde probíhají záchranné práce integrovaného záchranného systému, pak bývá stopa pneumatiky degradována všemi výše uvedenými způsoby, ke kterým je možné přidat ještě její odplavení či zametení, při pracích hasičského záchranného sboru.

Degradujícím prvkem dokumentace stop pneumatik jsou při využití současných metod světelné podmínky v době dokumentace. Obecně platí, že čím horší jsou světelné podmínky, tím obtížněji je možné pomocí fotoaparátu či kamery stopu pneumatiky zadokumentovat, viz **obr. 48**.



Obr. 48: Fotodokumentace stop na identickém místě dopravní nehody v noci a druhého dne ráno⁹³

Teoreticky je možné připustit, že s dostatečným vybavením by bylo možné tento problém výrazně eliminovat, je však nutné konstatovat, že finanční i prostorové možnosti jednotek vyjíždějících k dokumentaci dopravních nehod nedovolují používání několika statických výkonných fotografických blesků a profesionální zrcadlovky se sadou výměnných objektivů.

⁹³ archiv ÚSI VUT v Brně

3 CÍLE PRÁCE

Primárním cílem této dizertační práce je *nalezení metody detekce opticky nezřetelných stop pneumatik na vozovce*, která bude co nejméně ovlivnitelná dokumentující osobou a zároveň bude dostatečně rychlá (doba trvání by neměla přesáhnout dobu obvyklou na ohledání místa dopravní nehody policií s vážným zraněním či úmrtím, tj. *80 minut*) a přesná. Detekce nezřetelných stop na místě dopravní nehody je aktuální otázkou, protože stávající dokumentační metody přestávají dostačovat. Pro analýzu dopravních nehod, ale i další vývoj v oblasti asistenčních systémů a bezpečnosti vozidel celkově, je však nutné mít co možná nejpresnější vstupní hodnoty. Nalezení vhodné metody bude znamenat velmi účinný nástroj pro zaznamenávání dopravních nehod a získávání dat pro další výzkum.

Dílčí cíle pak odpovídají jednotlivým metodám detekce:

Provéřit využití termokamery pro detekci stop na vozovce – práce zabývající se detekcí stop pomocí termokamery byla zpracována v roce 2003. Od té doby však došlo v oblasti termokamer k značnému vývoji – rozsahy měření, teplotní rozlišitelnost atd. Také se výrazně zlepšila jejich cenová dostupnost, kdy nejjednodušší kamery se již nepohybují v řádech statisíců, ale pouze desetitisíců. Proto je žádoucí tuto metodu opět prověřit z hlediska její využitelnosti provedením několika sérií jízdních zkoušek za různých povětrnostních podmínek.

Provéřit možnosti identifikace částic běhounu pneumatiky s využitím LIBS – využitelnost této metody mimo laboratorní podmínky byla předběžně potvrzena provedením prvotních experimentů, které jsou popsány v práci Ing. Davida Procházky, Ph.D.⁹⁴ Pro ověření potenciálu využitelnosti je však nutné provést a vyhodnotit několik sérií měření s různými typy pneumatik, vozidel, povrchů, povětrnostních podmínek atd.

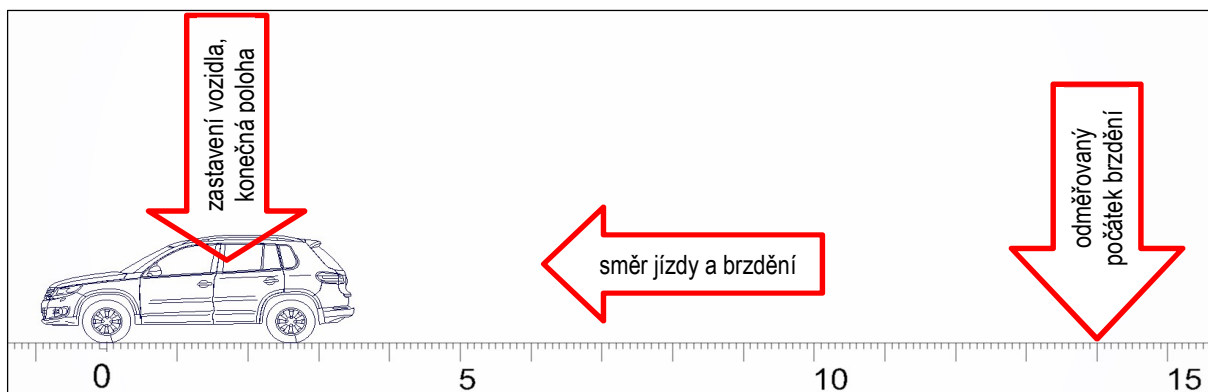
I když použití výše představených metod v praxi může v některých lidech vyvolat zdání o science fiction a obavy o neúměrné finanční náklady, prokázání jejich reálné využitelnosti může v důsledku znamenat další významný posun ve vývoji bezpečnosti vozidel, který může v budoucnu zachránit lidské životy.

⁹⁴ PROCHÁZKA, D.: Detekce brzdných stop pomocí spektrometrie laserem indukovaného plazmatu (LIBS) a spektrometrie laserem indukované fluorescence (LIBS + LIFS)

4 METODY VÝZKUMU

Pro splnění cílů a získání potřebného množství relevantních dat bylo nutné provést několik brzdných zkoušek osobních vozidel, za různých podmínek. Průběh brzdných zkoušek však byl ve všech případech identický: byly zadokumentovány podmínky testu – typ povrchu, vozidlo, pneumatiky, povětrnostní podmínky atd., následně bylo testovací vozidlo osazeno přístroji schopnými zaznamenat průběh zrychlení při testu (XL Meter, Racelogic Performance Box apod.), poté byla provedena samotná brzdná zkouška, kdy vozidlo bylo urychleno na požadovanou rychlost (30 až 130 km/h) a následovalo maximální brzdění vozidla, tj. plné sešlápnutí brzdového, případně i spojkového pedálu. Po zastavení vozidla, bylo toto fotograficky zadokumentováno v konečné poloze včetně pohledů ve směru a proti směru brzdění, a posléze odstaveno mimo testovací prostor.

Konečná pozice vozidla byla označena (na úrovni předních kol) a počátek brzdné stopy byl odměřen pomocí mechanického krokoměru („měřičského kolečka“) na základě dat z akcelerometru XL Meter, viz **obr. 49**. Počátek brzdění byl současně při některých měřeních označen pomocí zařízení upevněného na zadním nárazníku spouštěného společně s brzdovými světly. Trajektorie brzdné dráhy kola testovacího vozidla byla zvýrazněna pomocí křídly a provázku pro následnou detekci brzdných stop vozidla s využitím termokamery a přístroje rLIBS.



Obr. 49: Schéma průběhu brzdných zkoušek⁹⁵

4.1.1 Využití termokamery

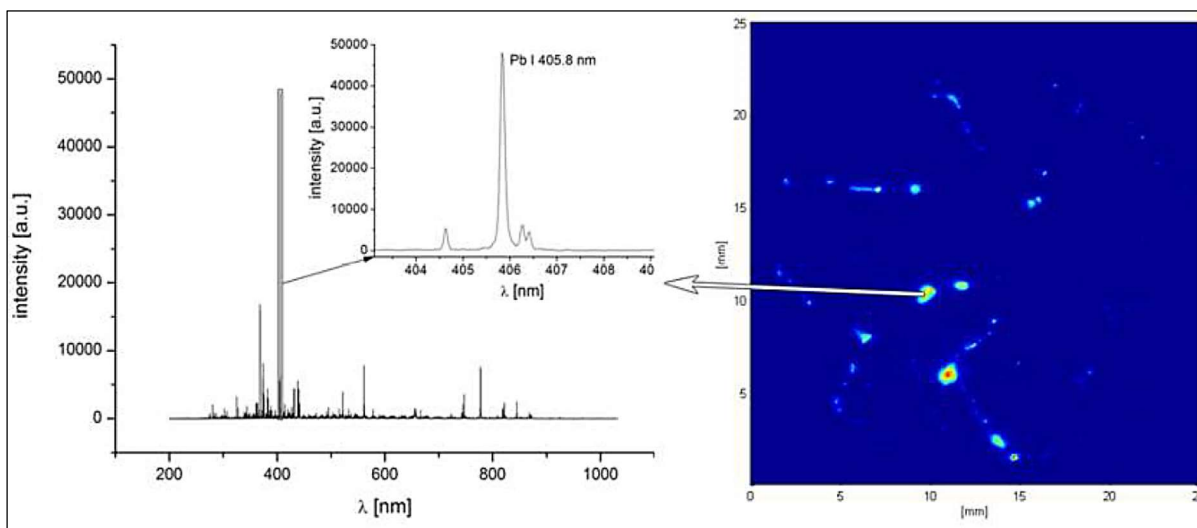
Při intenzivním brzdění vozidla vzniká na suchém povrchu vozovky vlivem tření pneumatik detekovatelný tepelný účinek, který byl dle měření, která provedl Ing. Vlastimil Rábek, Ph.D., detekovatelný po dobu cca 15 sekund, vzniklé tepelné pole bylo možné s použitou technikou detekovat až do cca 30 minut. Další ovlivnění, které je možné detekovat termokamerou je vlivem nánosu mikrootěrů, tj. částic pneumatiky, které mají jinou emisivitu než povrch vozovky.

⁹⁵ archiv autora

Dle závěrů Ing. Vlastimila Rábka, Ph.D., použití termokamery pro detekci nezřetelných brzdných stop může za určitých povětrnostních podmínek přinést výrazný zisk optické informace. Při chladnějším počasí byl termografický zisk informace o nezřetelných brzdných stopách velmi slabý a nesystematický, zatímco při podmínkách parného počasí bylo dosaženo pozoruhodných zisků optické informace o nezřetelné brzdné stopě. Rozptyl podmínek měření by tedy měl obsáhnout co nejširší škálu suchých povětrnostních podmínek.

4.1.2 Využití LIBS

Pomocí metody LIBS je možné v reálném čase provádět kompletní prvkovou analýzu vybraného bodu, jehož velikost závisí na použité energii laseru, na vlnové délce laseru, na délce pulzu, na fokusační optice a na vlastnostech vzorku, řádově se však pohybuje od jednotek do stovek μm . V případě rozsáhlejší dokumentované oblasti je možné vytvořit dvourozměrné, případně trojrozměrné rozložení zkoumaných prvků, které je možné nazvat pojmy jako chemická nebo prvková mapa. Každému bodu takto vytvořené mapy odpovídá intenzita, nebo plocha vybrané spektrální čáry zkoumaného prvku. Z hlediska dokumentace brzdných stop na vozovce je pak možné tyto identifikovat na základě prvkové mapy vhodně zvoleného prvku (zinku), který je obsažen pouze v částicích pneumatik, které byly na vozovku otřeny při brzdění či smyku vozidla. Na dalším obrázku vyobrazená prvková mapa zkoumaného vzorku o rozměrech $25 \times 25 \text{ mm}$.⁹⁶



Obr. 50: Ukázka chemické mapy výskytu olova ve zkoumaném vzorku vytvořená pomocí LIBS⁹⁶

Případná prvková mapa pro oblast místa dopravní nehody by tedy mohla být vytvořena v principu shodným způsobem pomocí sítě zkoumaných bodů, ale její rozměry by byly mnohonásobně větší.

⁹⁶ PROCHAZKA, D.: Detekce brzdných stop pomocí spektrometrie laserem indukovaného plazmatu (LIBS) a spektrometrie laserem indukované fluorescence (LIBS + LIFS)

Podmínkou však je, aby citlivost detekčního zařízení byla dostatečná pro identifikaci zinku v otěrech pneumatiky na vozovce. Určení limitů detekce pro pneumatiku na vozovce je však poměrně komplikované, kdy významným problémem je „rovinnost“ vozovky. Jedním z parametrů ovlivňujících poměr získaného signálu k šumu je velikost ablačního kráteru, který je dobře kontrolovatelný v laboratorních podmínkách pomocí náhledové kamery. U mobilního zařízení použitého na reálné vozovce však, v současném konstrukčním uspořádání, není možné udržet tento parametr konstantní. Dalším problémem je příprava kalibračních standardů.

Pro detekci brzdné stopy ale není potřeba znát absolutní koncentraci částic pneumatiky v místě měření, pro posouzení postačuje binární informace, zda se v předmětném bodě částice (prvek obsažený pouze v pneumatice) pneumatiky nachází anebo nenachází v nadprahovém množství. Prahová hodnota intenzity signálu, při které je možné rozhodnout, zda je hledaný prvek přítomen. může být vyjádřena pomocí blanku (povrchu vozovky bez částic pneumatiky) pomocí následující rovnice:

$$x_L = \bar{X}_B + k \cdot s_B$$

kde \bar{X}_L je průměr signálu blanku, s_B je směrodatná odchylka signálu blanku a k je faktor vyjadřující požadovanou hodnotu jistoty. Pro $k = 3$ všechny hodnoty vyšší než x_L s pravděpodobností 99,7 % přísluší spektrální čáře zinku. Naměřená směrodatná odchylka blanku z 16 nezávislých měření vozovky vyšla $s_B = 638,15$ a průměr signálu blanku (pozadí) $\bar{X}_B = 1017$. Z těchto hodnot vychází prahová hodnota intenzity pro detekci zinku na povrchu vozovky přibližně $x_L = 2933$. Měření brzdné stopy, viz **obr. 42**, bylo provedeno při opakovací frekvenci laseru i detektoru 20 Hz a každý bod vyneseny v grafech je průměrem z deseti výstřelů laseru (bodů na vozovce).

Základem detekčního přístroje využívajícího metodu LIBS musí být laser s poměrně vysokým výkonem a co nejvyšší opakovací frekvencí. Z hlediska úspory nákladů by jako analyzátor mohl sloužit spektrometr naladěný na vybranou spektrální čáru, vybavený „pouze“ fotonásobičem. Díky tomu by bylo možné dosáhnout vysoké citlivosti a současně vysoké opakovací frekvence měření. V případě vybavení přístroje vhodným softwarem a snímačem polohy by mohl být přístroj schopen zobrazovat detekovanou brzdnou stopu v reálném čase.⁹⁷

⁹⁷ PROCHAZKA, D.: Detekce brzdných stop pomocí spektrometrie laserem indukovaného plazmatu (LIBS) a spektrometrie laserem indukované fluorescence (LIBS + LIFS)

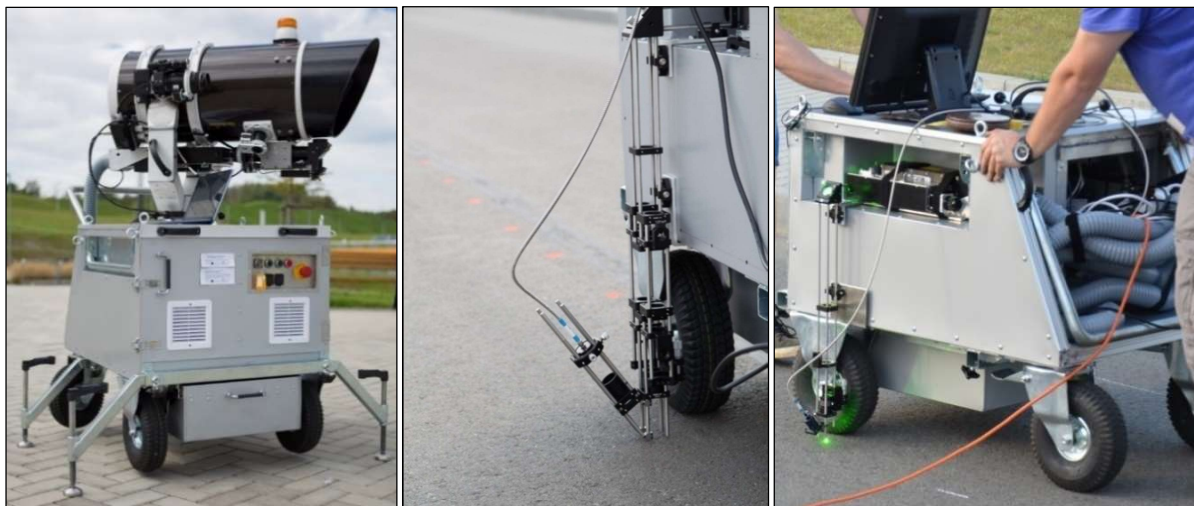
5 POPIS POUŽITÉHO VYBAVENÍ

5.1 MĚŘICÍ PŘÍSTROJE

Mobilní laboratoř - rLIBS

Mobilní laboratoř pro dálkovou Spektrometrii laserem buzeného plazmatu (rLIBS) byla navržena na Ústavu fyzikálního inženýrství Fakulty strojního inženýrství Vysokého učení technického v Brně Ing. Janem Novotným Ph.D. v rámci jeho dizertační práce⁹⁸. Vlastní konstrukční řešení zařízení rLIBS je podrobně popsáno v diplomových pracích Ing. Michala Brady⁹⁹ a Ing. Michala Petrilaka¹⁰⁰. Toto zařízení od doby svého vzniku prochází neustálým vývojem.

Základem zařízení rLIBS během provedených měření byl laser Quantell CFR-400 pracující s opakovací frekvencí 20 Hz na vlnové délce 532 nm, s maximální energií 200 mJ na jeden pulz. Základní sběrnou optikou je speciálně navržené sférické zrcadlo zasazené do teleskopu Newtonova typu. Druhá možnost umístění laserové hlavy je v šachtě vozíku spolu s využitím speciálního modulu, který pomocí soustavy zrcadel směřuje laserový svazek z šachty pro laser ve vozíku kolmo k zemi. Na povrch vozovky je pak svazek fokusován pomocí čočky umístěné v klecovém systému s posuvem. Vizualizace detekce s přístrojem rLIBS je na **obr. 51**.



Obr. 51: Mobilní zařízení rLIBS – vlevo s teleskopem, uprostřed – detail modulu pro detekci brzdných stop na vozovce, vpravo – Laserový pulz

Sběrná optika byla vzhledem k laserovému svazku umístěna pod úhlem 45 °. Díky tomuto speciálnímu modulu pro analýzu povrchu vozovky jsou tak při měřeních nastoleny obdobné

⁹⁸ NOVOTNÝ, J.: Dálkově řízená laserová spektroskopie (LIBS)

⁹⁹ BRADA, M.: Polohovací jednotka pro laserovou spektroskopii

¹⁰⁰ PETRILAK, M.: Řídicí systém pro dálkovou laserovou spektroskopii

podmínky, jako v případě měření v laboratoři v interakční komoře – v porovnání s ní má fokusační optika menší hloubku ostrosti a sběrná optika je umístěna blíže ke vzniklému plazmatu.

XL Meter

XL Meter je bateriově napájený univerzální přístroj, s alfanumerickým LCD, který měří zrychlení či zpomalení ve dvou osách. Z technického hlediska se XL Meter skládá ze tří hlavních částí: jednotky obsahující elektronickou část, vakuové přísavky a kloubového ramene umožňujícího přizpůsobitelné upevnění. Celý měřicí systém přístroje XL Meter je integrován na jednom akcelerometrickém čipu. XL Meter je schopen měření pozitivního i negativního zrychlení až do úrovně $\pm 2\text{ g}$ při frekvenci záznamů 200 Hz . XL Meter využívá rozdílový kapacitní senzor zrychlení. Ten se skládá z nezávisle upevněných destiček a centrálních destiček připojených k základně, které pohybem reagují na působící zrychlení. XL Meter je navržen pro měření zrychlení ve dvou osách (podélné a příčné). V případě realizovaných měření byl přístroj umístěn podle doporučení, tedy na střed předního skla měřeného vozidla, viz **obr. 52**.



Obr. 52: XL Meter nainstalovaný na předním skle testovaného vozila¹⁰¹

Racelogic

Telemetrie RaceLogic Performance Box, viz **obr. 53**, je určena především ke sběru a analýze dat z jízdy na okruhu. Měření zrychlení probíhá pomocí GPS se snímkovací frekvencí 10 Hz , přístroj dále vyhodnocuje maximální rychlost a pomocí GPS také zaznamenává jízdní dráhu testovaného vozidla a mnoho dalšího. Vzhledem k nižší frekvenci záznamu však byla telemetrie RaceLogic používána pouze jako záložní měřidlo.

¹⁰¹ archiv autora

Obr. 53: Telemetrie Racelogic¹⁰²**Termokamera FLUKE**

Termokamera Fluke Ti 400-60, **obr. 54**, je profesionální termokamera s rozsahem měření teploty od $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ až po $+1\,200\text{ }^{\circ}\text{C}$, teplotní citlivost snímače je $\leq 0,05\text{ }^{\circ}\text{C}$ při $30\text{ }^{\circ}\text{C}$, celkový počet pixelů IR snímače je 76 800, termokamera je také vybavena „běžným“ fotoaparátem s rozlišením 5 MPix díky tomu je možné vytvářet tzv. obraz v obraze. Termokamera obsahuje systém automatického zaostřování LaserSharp, zaostření je však možné provést také v manuálním režimu. K termokameře je standardně dodáván SW, ve kterém je možné získaná data vyhodnotit a zpracovat – doplnit či odebrat značky, změnit emisivitu atd.

Obr. 54: Termokamera Fluke Ti 400¹⁰³**Škoda datalogger**

V průběhu měření v roce 2015 byl ve vozidle byl umístěn datalogger, který zapůjčila společnost Škoda Auto spolu s vozidlem. Tento datalogger v průběhu jednotlivých měření zaznamenával údaje z řídících jednotek testovaného vozidla, zejména se jednalo o údaje o rychlostech jednotlivých kol pro určení skluzu, brzdovém tlaku, zásahu ABS atd.

¹⁰² www.racelogic.com

¹⁰³ <http://www.fluke.com/fluke/czcs/termokamery/Fluke-Ti400.htm>

Zařízení pro označení počátku brzdění na vozovce

Pro ověření údajů přístroje XL Meter při měřeních v roce 2015 bylo sestaveno zařízení, které sestávalo z čerpadla, nádržky na vodu a trysky, viz **obr. 55**. Čerpadlo bylo spínáno kontaktem pro brzdová světla vozidla, tedy bylo uvedeno do činnosti sešlápnutím brzdového pedálu. Případná prodleva mezi sepnutím brzdových světel a dokončením náběhu plného brzdového účinku byla pro potřeby měření zanedbatelná a byla částečně kompenzována prodlevou mezi sepnutím čerpadla a prvním dopadem kapaliny na vozovku.



Obr. 55: Zařízení pro označení počátku brzdění na vozovce připevněné na testovacím vozidle¹⁰⁴

5.2 VOZIDLA A PNEUMATIKY

Pro měření realizovaná v rámci dizertační práce bylo použito celkem 13 vozidel vybavených systémem ABS. Jednalo se o vozidla jak továrně nová, tak již několik let používaná, což platilo také pro jejich pneumatiky. Podrobnější údaje o vozidlech, včetně jejich využití v rámci jednotlivých let testování, jsou uvedeny v následující **tab. 3**.

Tab. 3: Parametry testovacích vozidel

vozidlo	pneumatiky	výrobce	označení	DOT	sada měření
VW Bora	zimní	Matador	195/65 R15	2309	2014 – léto
Škoda Octavia I RS	zimní	Goodyear	205/55 R16	4308	2014 – léto
VW Tiguan	letní	Michellin	235/55 R17	3211	2014 – lé, po, zi; 2016 - léto
Ford Focus	letní	Michellin	215/55 R16		2014 – podzim
VW Golf Plus	letní	Goodyear	205/55 R16		2014 – podzim

¹⁰⁴ archiv autora

vozidlo	pneumatiky	výrobce	označení	DOT	sada měření
Škoda Octavia III	letní	Dunlop	225/45 R17	4614	2015 – léto
	zimní	Continental	225/45 R17	2411	2015 – léto
	letní	Dunlop	225/45 R17	1113	2015 – léto
Škoda Octavia II	letní	Continental	195/65 R15	0516	2016 – léto
Subaru Impreza	letní	Goodyear	205/50 R15	1615	2016 – léto
Škoda Superb Combi III	letní	Pirelli	235/45 R18	2215	2016 – léto
Škoda Fabia III	letní	Dunlop	185/60 R15	1114	2016 – léto
Škoda Superb III	letní	Continental	215/55 R17	0415	2016 – léto
Škoda Octavia LK II	letní	Continental	225/45 R17	0116	2016 – léto
Honda Jazz	letní	Bridgestone	175/65 R15	7GYU	2016 – léto

5.3 POVRCHY

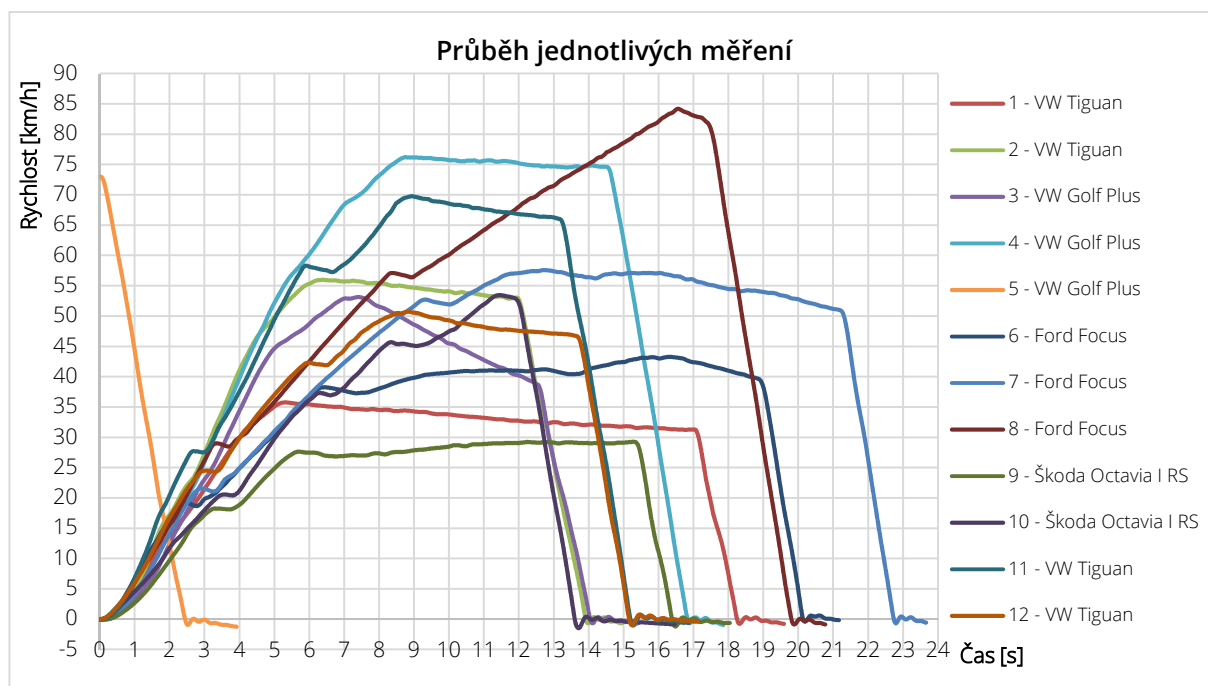
Jako testované povrchy byly zvoleny úseky silnic, úseky byly rovné s minimálními podélnými sklony, viz **tab. 4**, které byly při následném vyhodnocení dat kompenzovány.

Tab. 4: Parametry testovaných povrchů

lokace	povrch	stáří	využívanost	sada měření	teplota
Údolní – uvnitř areálu	živičný	starý	minimálně	2014 – lé, po	22 °C, 8 °C
Technická	živičný	starý	malá	2014 – lé, po, zi; 2015 – lé; 2016 – lé	22 °C, 8 °C, 2 °C; 26 °C; 28 °C
Tovární	živičný	starý	střední	2015 – lé	27 °C
Autodrom	živičný	starý	malá	2015 – lé	28 °C
Hradecká	živičný	starý	vysoká	2016 – lé	26 °C
Hradecká	živičný	nový	nepoužitý	2016 – lé	26 °C

6 DETEKCE STOP S VYUŽITÍM TERMOKAMERY

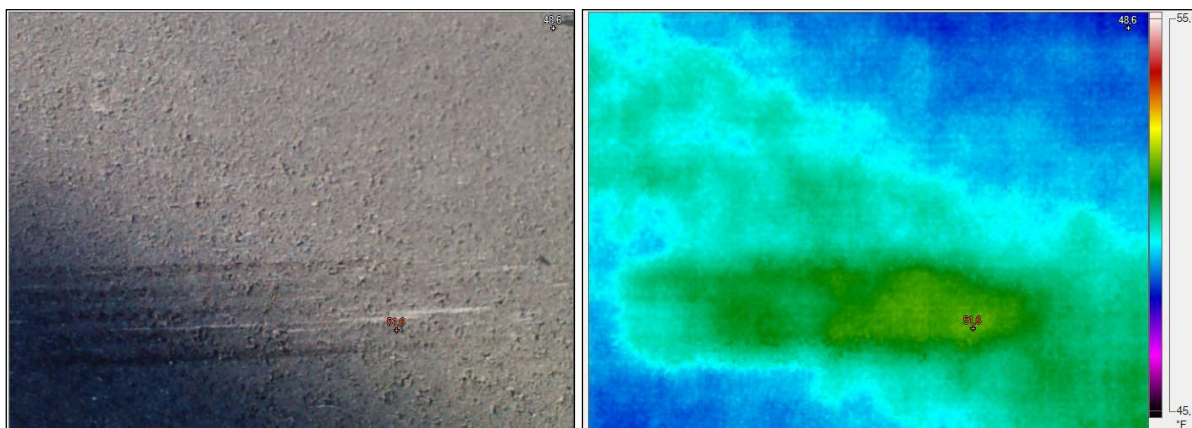
Pro ověření možností využitelnosti termokamery pro detekci opticky nezřetelných stop byla realizována sada měření v roce 2014, pro měření byla použita vozidla VW Tiguan, VW Golf Plus, Ford Focus a Škoda Octavia I RS. Měření byla realizována na komunikacích v areálech VUT v Brně na ulicích Údolní a Technická. Výchozí rychlost na počátku plného brzdění vozidla byla v rozmezí 30 km/h až 83 km/h. Průběh jednotlivých měření je patrný z **obr. 56**.



Obr. 56: Průběh měření provedených v roce 2014¹⁰⁵

Bezprostředně po zastavení vozidla byla vozovka za vozidlem zadokumentována pomocí fotoaparátu a následně termokamery, snímání termokamerou pak bylo opakováno s cca 15 až 20 minutovým odstupem. Při použití reálného rozmezí emisivity asfaltového povrchu přímo na místě bylo zjištěno, že detekovatelné oteplení povrchu vozovky vlivem brzdění vozidla bylo po dobu maximálně několika sekund. Při zpracování dat s pomocí Fluke SmartView pak byla následně změněna jak emisivita, tak % přenosu signálu s jasným cílem zviditelnit brzdovou stopu, nikoliv teplotu dokumentovaného povrchu vozovky a brzdné stopy, viz **obr. 57**.

¹⁰⁵ archiv autora



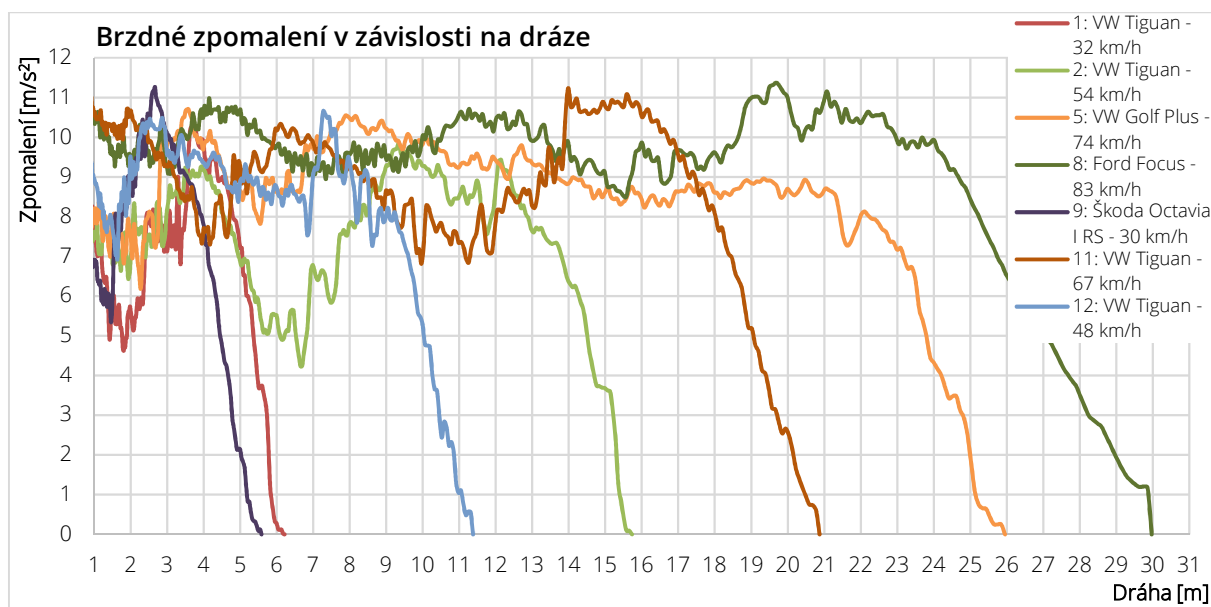
Obr. 57: Zvýraznění vychladlé blokovací stopy vozidla¹⁰⁶

Detail viditelného konce brzdné/blokovací stopy vozidla VW Tiguan cca 1 hodinu po jejím vzniku, tj. vychladlá na teplotu povrchu vozovky. V IR spektru má ale stopa díky různé emisivitě „různou teplotu“, tzn. je možné ji zvýraznit (max. teplota 11 °C, reálná teplota povrchu 3 °C).

Vyhodnocením získaných termografických snímků bylo zjištěno jak zvýraznění opticky nezřetelné stopy, viz **kap. 6.1**, tak znevýraznění opticky zřetelných stop, viz **kap. 6.2**, potvrzena byla také možnost detekce konečné polohy vozidla před jeho odstavením, viz **kap. 6.3**.

6.1 ZVÝRAZNĚNÍ OPTICKY NEVÝRAZNÝCH STOP

Zvýraznění opticky nezřetelných brzdných stop bylo dosaženo u všech testovaných vozidel a pneumatik. V následujících 7 případech, jejichž průběh zpomalení v závislosti na dráze je patrný z **obr. 58**, bylo zvýraznění stop významné.



Obr. 58: Průběh dosaženého brzdného zpomalení při měřeních 1, 2, 5, 8, 9, 11 a 12¹⁰⁷

¹⁰⁶ archiv autora

¹⁰⁷ archiv autora

Při měření č. 1 došlo k zajímavému zvýraznění stopy v IR spektru – brzdná stopa vozidla VW Tiguan se bez úprav emisivity jevila o 1 °C chladnější než její okolí (8 °C), viz **obr. 59**. Tato skutečnost byla způsobena odpařováním vody, jejíž kapky padaly na jinak suchou vozovku ze stromů, brzděním vozidla pak došlo k jejich rozprostření a následnému odpařování, tedy chladnutí povrchu. Tento jev byl pozorovatelný po dobu cca 20 minut.



Obr. 59: Měření č. 1 – VW Tiguan, výchozí rychlost 32 km/h, brzdná dráha 5,85 m¹⁰⁸

Při měření č. 2 bylo možné s využitím termokamery zvýraznit levou brzdou stopu vozidla VW Tiguan, která se po změně emisivity povrchu vozovky jevila o 1 °C teplejší než její okolí (8 °C), viz **obr. 60**. Dokumentace brzděné stopy pomocí termokamery byla provedena 15 minut po zastavení vozidla, tj. po vymizení teplotního účinku brzdění na povrch vozovky.

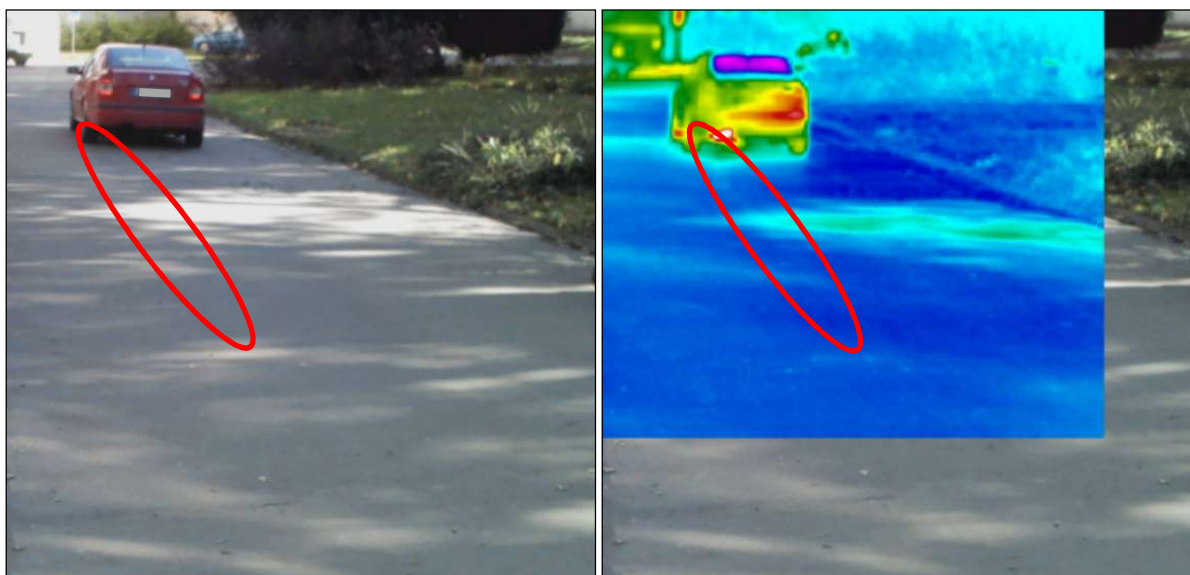


Obr. 60: Měření č. 2 – VW Tiguan, výchozí rychlost 54 km/h, brzdná dráha 15,2 m¹⁰⁹

¹⁰⁸ archiv autora

¹⁰⁹ archiv autora

Při měření č. 9 bylo dosaženo slabého zvýraznění, viz **obr. 61**, levé brzdné stopy vozidla Škoda Octavia I RS, která se bez změny emisivity povrchu vozovky jevila o 0,5 °C teplejší než její okolí.



Obr. 61: Měření č. 9 Škoda Octavia I RS, výchozí rychlost 30 km/h, brzdná dráha 5,1 m¹¹⁰

Při měření č. 11 byla s využitím změny emisivity povrchu velmi významným způsobem zvýrazněna část brzdné stopy pravého předního kola vozidla VW Tiguan. Část stopy, která byla opticky nezřetelná, se tak jevila o několik stupňů teplejší než její okolí, viz **obr. 62**. Dokumentace části brzdné stopy pomocí termokamery byla provedena 3 minuty po zastavení vozidla, tj. teplotního účinek brzdění na povrch vozovky by již neměl mít vliv.



Obr. 62: Měření č. 11 – VW Tiguan, výchozí rychlost 67 km/h, brzdná dráha 20,4 m¹¹¹

Při měření č. 12 byla s využitím termokamery dokumentována délka vlivu teplotního účinku brzdění vozidla VW Tiguan na povrch vozovky. Nejprve byla nastavena reálná emisivita povrchu

¹¹⁰ archiv autora

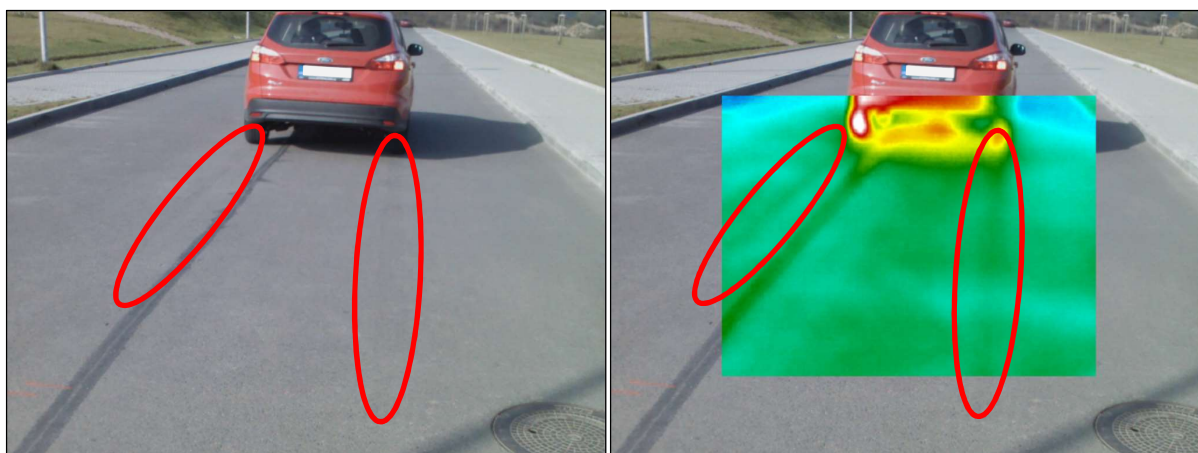
¹¹¹ archiv autora

vozovky v místě očekávaného zastavení vozidla, následně byla provedena jízdní zkouška. Termografický snímek brzdných stop vozidla byl proveden bezprostředně po zastavení vozidla. Oteplení povrchu vlivem brzdění vozidla v místě levé opticky nezřetelné brzdné stopy bylo v úrovni cca 0,8 °C, toto oteplení bylo detekovatelné po dobu cca 10 sekund, viz **obr. 63**.



Obr. 63: Měření č. 12 – VW Tiguan, výchozí rychlost 48 km/h, brzdná dráha 10,9 m¹¹²

Při měření č. 8 bylo dosaženo zvýraznění opticky slabě zřetelných brzdných stop vozidla Ford Focus. S využitím změny emisivity povrchu se brzdné stopy vozidla jeví o cca 1,7 °C teplejší než jejich okolí, viz **obr. 64**. Dokumentace brzdných pomocí termokamery byla provedena 2 minuty po zastavení vozidla, tj. na základě provedených měření by oteplení vozovky vlivem brzdění již mělo být zanedbatelné.



Obr. 64: Měření č. 8 – Ford Focus, výchozí rychlost 83 km/h, brzdná dráha 29,5 m¹¹³

Při měření č. 5 bylo dosaženo s využitím změny emisivity povrchu zvýraznění opticky nezřetelných brzdných stop vozidla VW Golf Plus a také brzdných stop z předešlých brzdných zkoušek, viz **obr. 65**. Dokumentace brzdných pomocí termokamery byla provedena 4 minuty po zastavení vozidla VW Golf Plus a minimálně 20 minut po ukončení předešlých pokusů.

¹¹² archiv autora

¹¹³ archiv autora



Obr. 65: Měření č. 5 – VW Golf Plus, výchozí rychlost 74 km/h, brzdná dráha 25,5 m¹¹⁴

6.2 ZNEVÝRAZNĚNÍ OPTICKY ZŘETELNÝCH STOP

Zvýraznění opticky slabě zřetelných stop či nezřetelných stop s využitím termokamery bylo dosaženo pomocí postprocesingu získaných dat pomocí změny emisivity. Shodný postup však může vést i ke zcela opačnému výsledku, tj. znevýraznění opticky dobře zřetelných stop, tento případ bylo možné pozorovat například při zpracování dat z měření č. 10, jehož průběh zpomalení v závislosti na dráze je patrný z **obr. 66**.



Obr. 66: Průběh dosaženého brzdného zpomalení při měření č. 10¹¹⁵

Při měření č. 10 byly pomocí termokamery dokumentovány brzdné stopy vozidla Škoda Octavia I RS. Při zpracování dat byl proveden identický postup jako v případě měření č. 11 (viz **obr. 62**) kdy bylo dosaženo výrazného zvýraznění části opticky nezřetelné brzdné stopy. V případě

¹¹⁴ archiv autora

¹¹⁵ archiv autora

měření č. 10 však došlo v IR spektru k znevýraznění opticky slabě viditelných brzdných stop vozidla, viz **obr. 67**.



Obr. 67: Měření č. 10 Škoda Octavia I RS, výchozí rychlost 55 km/h, brzdná dráha 15,1 m¹¹⁶

Shodný postup byl aplikován také na detailní snímek levé brzdné stopy pod vozidlem Škoda Octavia I RS, která byla opticky poměrně dobře rozpoznatelná, v IR spektru však její obraz byl pouze velmi slabě odlišitelný od jejího okolí. viz **obr. 68**.



Obr. 68: Měření č. 10 Škoda Octavia I RS – detail konečné polohy¹¹⁷

6.3 DETEKCE KONEČNÉ POLOHY VOZIDLA PO Odstavení

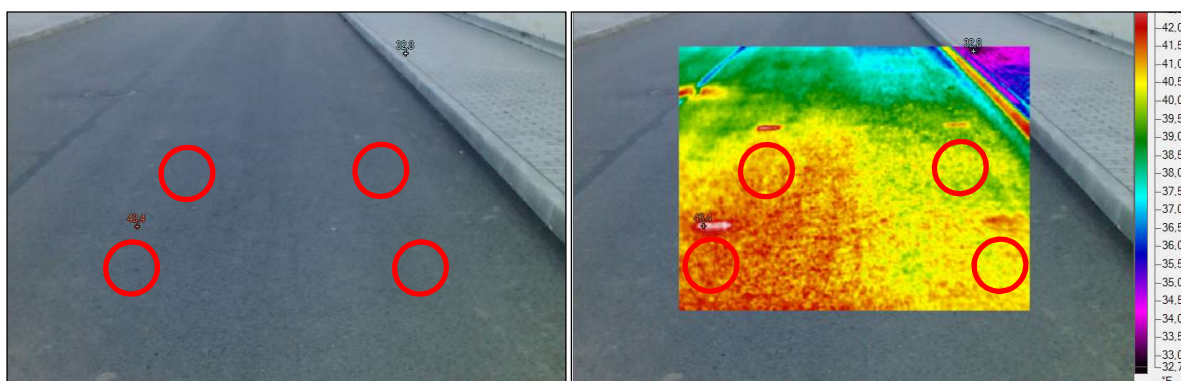
V průběhu všech měření byla prověřována možnost detekce konečné polohy vozidla po jeho odstavení. Testované vozidlo bylo po provedení brzdné zkoušky v konečné poloze vždy max. 8 minut, poté bylo odstaveno mimo zkušební prostor a oblast konečné polohy byla dokumentována

¹¹⁶ archiv autora

¹¹⁷ archiv autora

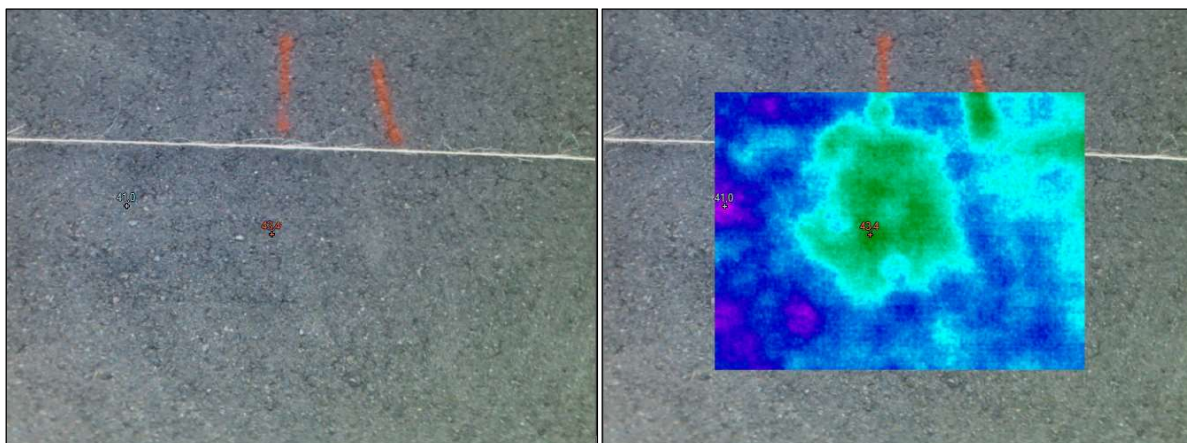
pomocí termokamery. Pro tyto měření byla nastavena reálná emisivita dokumentovaného povrchu pro zjištění tepelných otisků vozidla. U vozidla VW Tiguan se prakticky neprojevil tepelný otisk způsobený motorem, zatímco otisky pneumatik všech kol byly poměrně dobře rozpoznatelné, viz **obr. 69**.

Tepelný otisk pneumatik vozidla VW Tiguan, po měření č. 11, které stálo cca 5 minut v konečné poloze, byl detekovatelný i 10 minut po přemístění vozidla. Jednotlivá místa konečných poloh pneumatik byla o 1,8 až 2,2 °C teplejší než jejich okolí, čímž byla ověřena možnost detekce konečné polohy vozidla po jeho přemístění s odstupem času. V souladu se závěry Ing. Vlastimila Rábka, Ph.D. bylo možné očekávat také tepelný otisk motoru, tento se však u vozidla VW Tiguan neprojevil. Toto lze přisuzovat kombinaci konstrukce vozidla typu SUV, tj. motor vozidla se nachází výše nad vozovkou, a povětrnostním podmínkám při měření – teplota 5 °C a mírný vánek.



Obr. 69: Tepelný otisk pneumatik vozidla VW Tiguan 10 minut po odstavení vozidla¹¹⁸

Detail tepelného otisku konečné polohy levé přední pneumatiky vozidla VW Tiguan po měření č. 12, které v konečné poloze stálo cca 7 minut, je na **obr. 70**. Otisk byl pomocí termokamery detekovatelný i cca 30 minut po přemístění vozidla.



Obr. 70: Tepelný otisk levé přední pneumatiky vozidla Tiguan 30 minut po odstavení vozidla¹¹⁹

¹¹⁸ archiv autora

¹¹⁹ archiv autora

6.4 SHRNUÍ DOSAŽENÝCH VÝSLEDKŮ

Pomocí série provedených měření byl potvrzen předpoklad využití termokamery za určitých podmínek (suchá vozovka, časový limit cca 30 minut po brzdění) pro zvýraznění či detekci opticky nezřetelných brzdných stop vozidel.

Tepelné ovlivnění povrchu vozovky bylo detekovatelné pouze po dobu několika sekund po brzdění vozidla, v praxi je tedy detekce tepelného ovlivnění povrchu vozovky termokamerou pro stanovení délky brzdné dráhy vozidla nevyužitelné.

Z hlediska detekovatelného teplotního ovlivnění povrchu vozovky je reálně využitelná možnost identifikace konečné polohy vozidla po jeho odstavení – toto bylo prokázáno při několika měřeních, kdy vozidlo stálo v konečné poloze alespoň 5 minut a následně bylo přemístěno. Tepelné otisky pneumatik předmětného vozidla bylo možné termokamerou identifikovat i po cca 30 minutách po přemístění vozidla.

Zvýraznění opticky nezřetelných brzdných stop vozidla s použitím termokamery je reálně proveditelné na základě různé emisivity povrchu vozovky a povrchu vozovky s brzdnou stopou. Při možnosti změny emisivity dokumentovaného objektu, a to jak přímo na místě, tak případně při následném zpracování dat, je možné i při jednotné teplotě odlišit oblasti s různou emisivitou, tj. brzdné stopy.

Pro následné zpracovávání dat je vhodné použít termokamery s možností záznamu typu „picture in picture“ s duálním záznamem – fotoaparát + termokamera s možností oddělitelného zobrazení obou snímků s prolínáním. Touto metodou je možné při určité změně emisivity velmi výrazným způsobem zvýraznit brzdnou stopu.

Zásadním prvkem, který má vliv na kvalitu získaných dat pomocí termokamery, je správné zaostření dokumentovaného objektu či prostoru, v případě nesprávného zaostření není možné tento nedostatek odstranit ani s pomocí softwaru. Dražší a profesionální modely termokamer disponují funkcí automatického ostření, u levnějších a dostupnějších modelů je však ostření prováděno ručně a je závislé na subjektivních schopnostech uživatele, jedná se tedy o subjektivně ovlivnitelnou metodu.

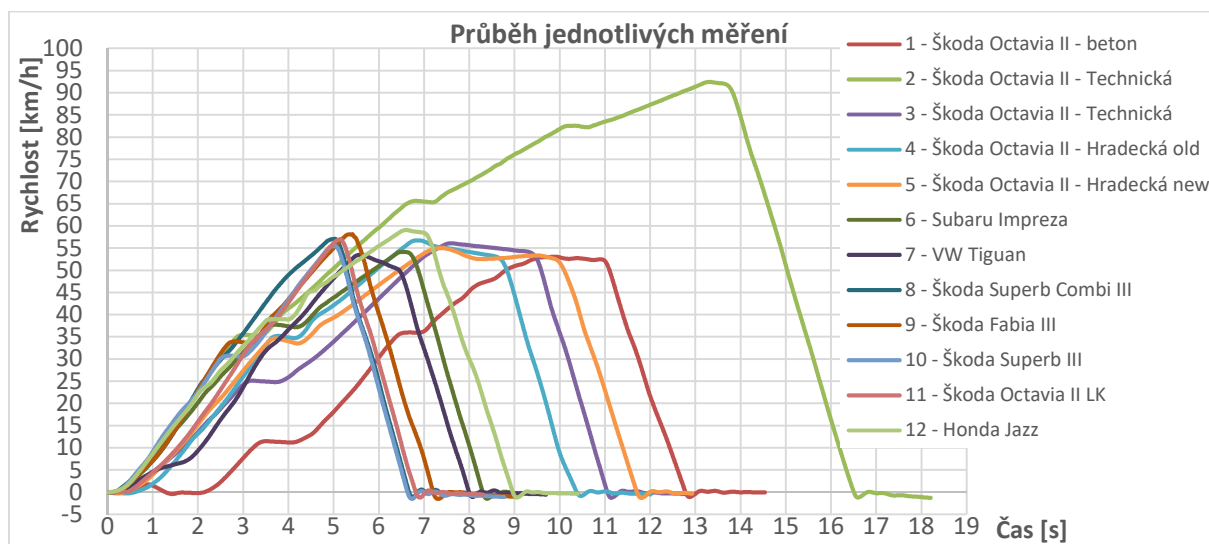
Výhodou této metody je její rychlost a časová nenáročnost, z pohledu nákladů se jedná o investici v řádu několika stovek tisíc Kč za kvalitní profesionální termokameru včetně vyhodnocovacího software. Nevýhodou je pak snadná subjektivní ovlivnitelnost a nemožnost využití při všech atmosférických podmínkách, například při dešti a na mokrému povrchu.

7 DETEKCE STOP POMOCÍ rLIBS

Použitelnost zařízení rLIBS pro detekci brzdných stop na vozovce byla prokázána při experimentu provedeném s vozidlem VW Bora v roce 2014.¹²⁰ Uvedený experiment byl proveden za „ideálních“ podmínek pro vznik otěrů pneumatiky a stop – zkušební povrch byl málo používaný, na vozidle byly zimní pneumatiky, teplota vzduchu byla 32 °C a teplota vozovky 48 °C.

Pro potvrzení obecného předpokladu využití bylo zapotřebí provést další série měření s variabilitou jak vozidel a pneumatik, tak opotřebení povrchu vozovky a teploty. Další otázkou k řešení byla rychlost degradace brzdné stopy. Za tímto účelem byly provedeny série jízdních zkoušek v letech 2014 až 2016, po kterých byly provedeny modifikace jak přístroje rLIBS, tak samotného způsobu sběru dat. Kvalitativně nejlepších výsledků bylo dosaženo při sérii testů v roce 2016, které budou popsány v následujících kapitolách.

Měření byla realizována na komunikacích v areálu VUT v Brně na ulici Technická s živičným a betonovým povrchem a na ulici Hradecká s opotřebeným a novým povrchem. Vliv degradace stopy byl zkoumán pro 2 modelové situace – působením pouze atmosférických vlivů, působením atmosférických a dalších vlivů (pohyb osob přes stopy, přejíždění stop vozidlem atd.) Pro testování byla zvolena následující vozidla: VW Tiguan, Škoda Octavia II, Subaru Impreza, Škoda Superb Combi III, Škoda Fabia III, Škoda Superb III, Škoda Octavia LK II a Honda Jazz. Výchozí rychlost na počátku plného brzdění vozidla byla v rozmezí 52 km/h až 93 km/h. Průběh jednotlivých měření je parný z **obr. 71**.



Obr. 71: Průběh měření provedených v roce 2016¹²¹

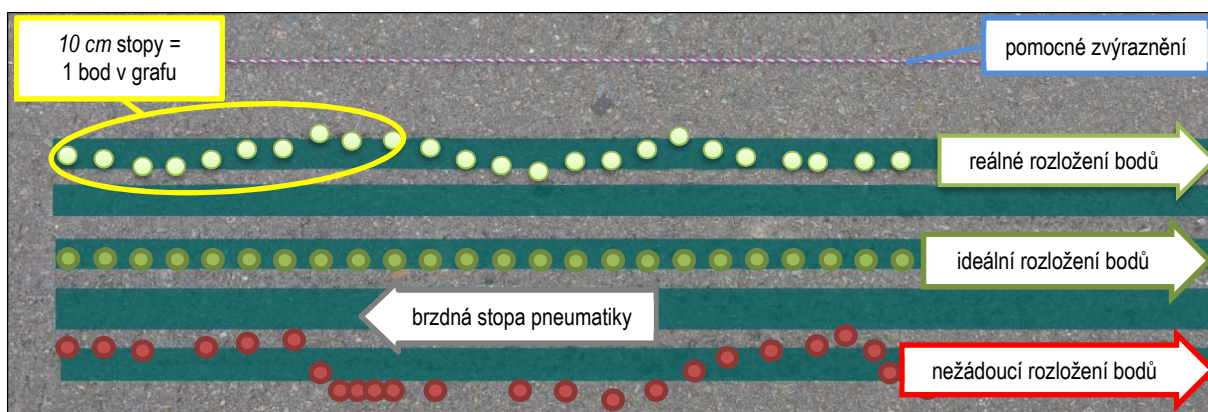
¹²⁰ PROCHAZKA, D.; BILÍK, M.; PROCHAZKOVÁ, P.; BRADA, M.; KLUS, J.; POŘÍZKA, P.; NOVOTNÝ, J.; NOVOTNÝ, K.; TICOVÁ, B.; BRADÁČ, A.; SEMELA, M.; KAISER, J. Detection of visually unrecognizable braking tracks using Laser-Induced Breakdown Spectroscopy, a feasibility study. Spectrochimica Acta Part B

¹²¹ archiv autora

Metodika sběru dat

Bezprostředně po zastavení vozidla byla vozovka za vozidlem zadokumentována pomocí fotoaparátu a případně termokamery, následně byla brzdná trajektorie vozidla zvýrazněna pomocí křídý nebo provázku a vozidlo bylo odstaveno. Dokumentace pomocí přístroje rLIBS byla provedena tak, že přístroj byl ručně konstantní rychlostí naváděn po trajektorii brzdné stopy od jejího zaznačeného konce směrem k počátku a dále do míst, kde již brzdění vozidla neprobíhalo.

Snahou bylo přístroj navádět tak, aby byla data sbírána z míst kontaktu dezénu pneumatiky s vozovkou. Jedno měření, tj. jeden chemický rozbor vozovky, pokrylo plochu přibližně 3 mm^2 , rozstup jednotlivých měření byl přibližně 1 cm v podélném směru brzdné trajektorie vozidla. Pro interpretaci výsledků v grafech pak bylo vždy minimálně 10 měření sdruženo a zprůměrováno v jeden bod, viz **obr. 72**.



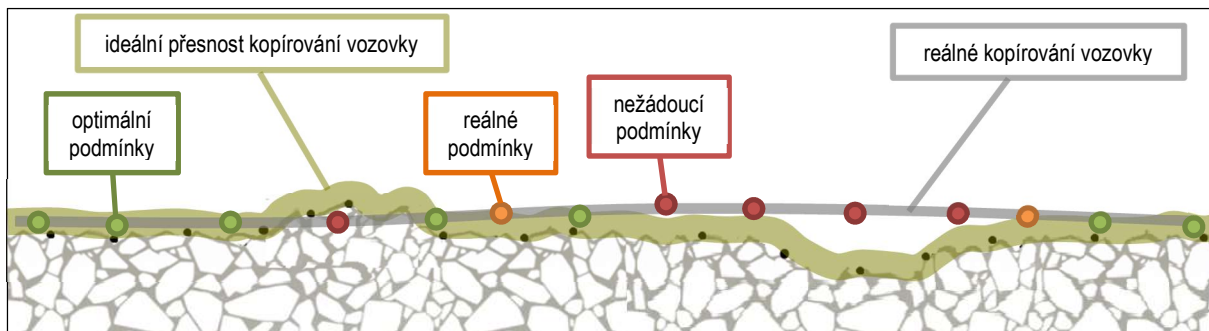
Obr. 72: Vizualizace rozmístění měřících bodů vzhledem k brzdné stopě¹²²

Časový odstup jednotlivých měření byl následující: I. do 30 minut po vzniku brzdné stopy až IV. 120 minut po vzniku brzdné stopy, což je maximální obvyklá doba pro provedení prací integrovaného záchranného systému a dokumentaci místa dopravní nehody.

Zásadním parametrem ovlivňujícím možnost sběru dat pomocí přístroje rLIBS používaného při měřeních bylo správné zaostření sběrné optiky na povrch vozovky. Při měřeních toto bylo realizováno ručně před počátkem měření a v průběhu měření již s nastavením nebylo manipulováno. V případě dostatečně rovné vozovky bylo dosaženo dobrých výsledků – hloubka ostrosti se pohybovala v přijatelném pásmu, viz **obr. 73**. V případě výrazně nerovné vozovky, tj. vyjetých kolejí, výtluků a podobně, konkrétně při měřeních v roce 2015 na ulici Tovární a na obslužné komunikaci na autodromu, celková konstrukce přístroje rLIBS neumožňovala dostatečné kopírování povrchu vozovky. Takto vzniklé odchylky od optimální hloubky ostrosti byly natolik

¹²² archiv autora

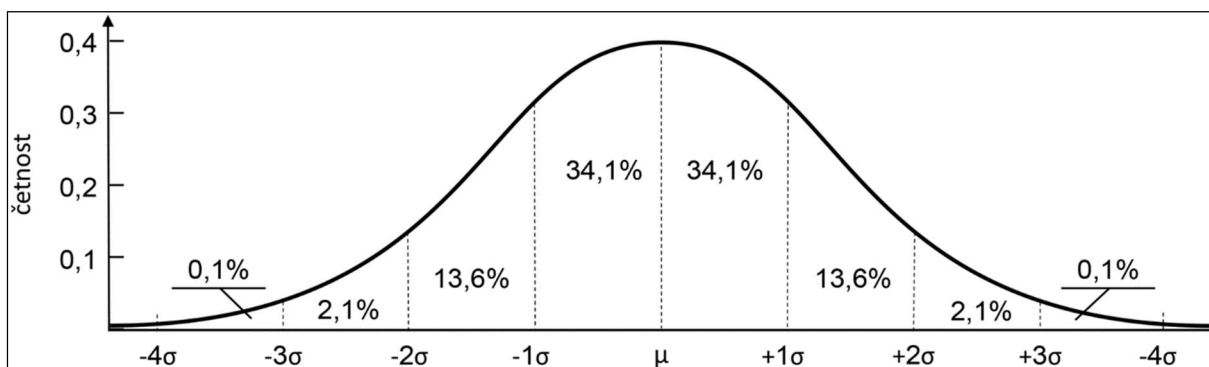
výrazné, viz **obr. 73**, že došlo ke ztrátě dat, resp. zisku natolik zkreslených dat, že je nebylo možné analyzovat.



Obr. 73: Vizualizace rozmístění měřicích bodů vzhledem k povrchu vozovky¹²³

Stanovení limitů detekce stopy

Aby bylo možné rozhodnout, zdali se v předmětném bodě nacházela brzdná stopa či nikoliv, bylo nutné stanovit detekční limit, při jehož překročení je možné s dostatečně vysokou pravděpodobností konstatovat, že se v daném místě stopa pneumatiky nachází. Pro tento účel bylo využito definice Mezinárodní unie pro čistou a užitou chemii, kdy limit detekce je definován jako koncentrace c_L odvozená od nejmenšího naměřeného signálu χ_L , který může být pro danou analytickou metodu detekován s požadovanou jistotou. Signál χ_L je definován rovnicí $\chi_L = \bar{X}_B + k \cdot s_B$, kde \bar{X}_B je průměr signálu blanku (povrchu vozovky bez brzdné stopy), s_B je směrodatná odchylka signálu blanku (na **obr. 74** označeno jako σ) a k je faktor vyjadřující požadovanou hodnotu jistoty dle normálního rozdělení, viz **obr. 74**. Vztah mezi signálem a koncentrací je dán směrnici kalibrační přímky, rovnice pro limit detekce tedy může být vyjádřena jako $LOD = k \cdot \left(\frac{s_B}{\bar{X}_B}\right) \cdot \left(\frac{\bar{X}_B}{b}\right)$, kde b je směrnice lineární části kalibrační křivky. Člen v první závorce popisuje relativní směrodatnou odchylku a člen v druhé závorce popisuje koncentraci odpovídající úrovni signálu pozadí.

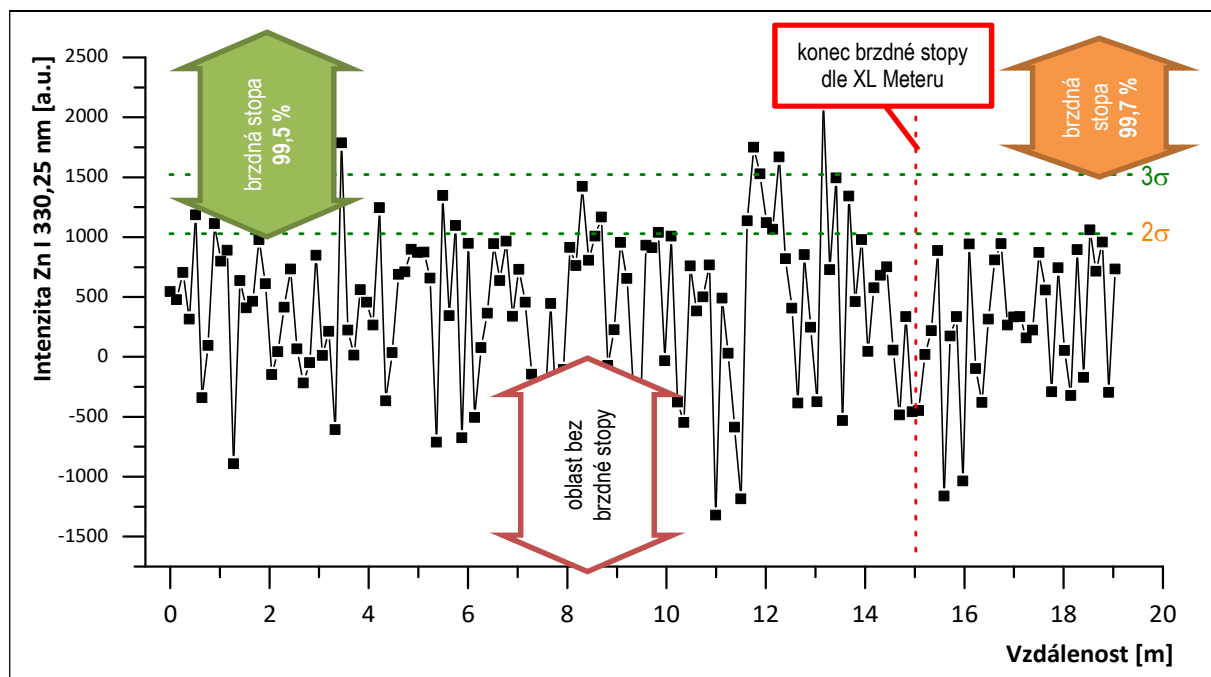


Obr. 74: Hustota normálního rozdělení se střední hodnotou μ a směrodatnou odchylkou σ ¹²⁴

¹²³ archiv autora

¹²⁴ https://www.wikiskripta.eu/w/Soubor:Normalni_rozdeleni.png

Pro hodnotou $k = 2$, tj. 2x směrodatná odchylka, je zahrnuto 95,5 % naměřených bodů blanku, pro hodnotou $k = 3$ je zahrnuto 99,7 % všech naměřených bodů blanku. Body s intenzitou přesahující tuto hodnotu je možné považovat za signál odpovídající stopě pneumatiky.



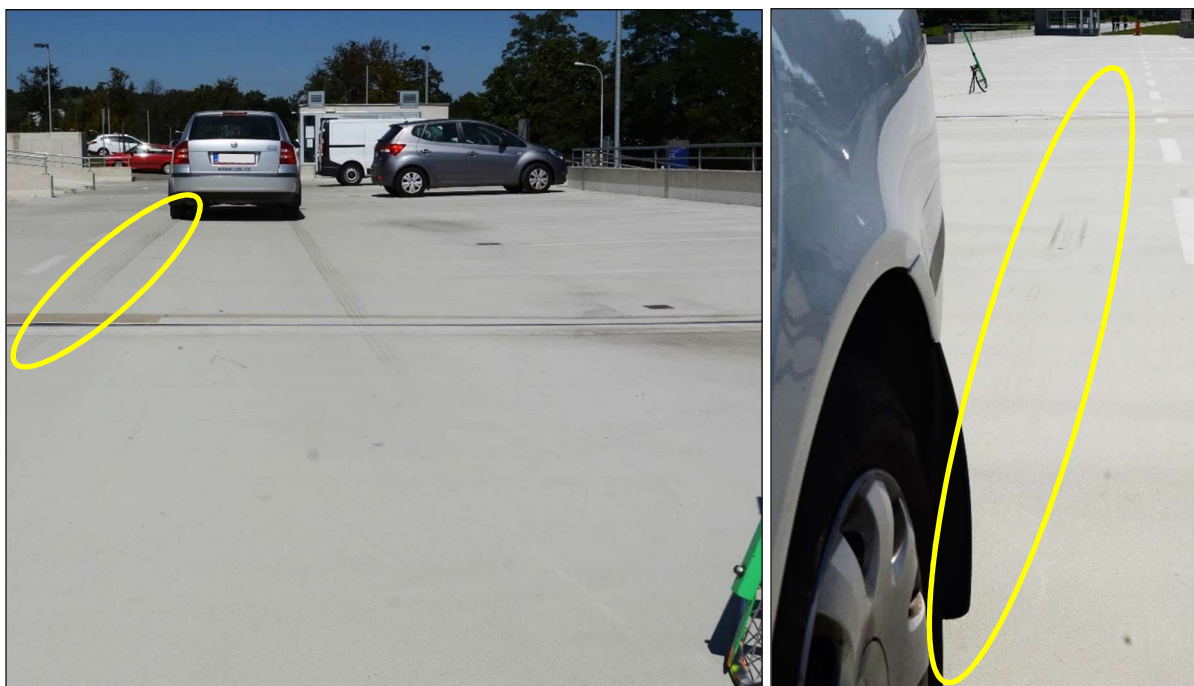
Obr. 75: Ukázka naměřených hodnot brzdné stopy na asfaltovém povrchu¹²⁵

Měření, při kterých byla brzdná dráha identifikována pomocí přístroje rLIBS byla prováděna v průběhu let 2014 až 2016, měřicí aparatura i samotná metodika byla v průběhu měření upravována a inovována s cílem optimalizace rychlosti sběru a přesedějším kvality získaných dat. V následujících kapitolách budou uvedena data z experimentů provedených v roce 2015.

7.1 DETEKCE STOP NA BETONOVÉM POVRCHU

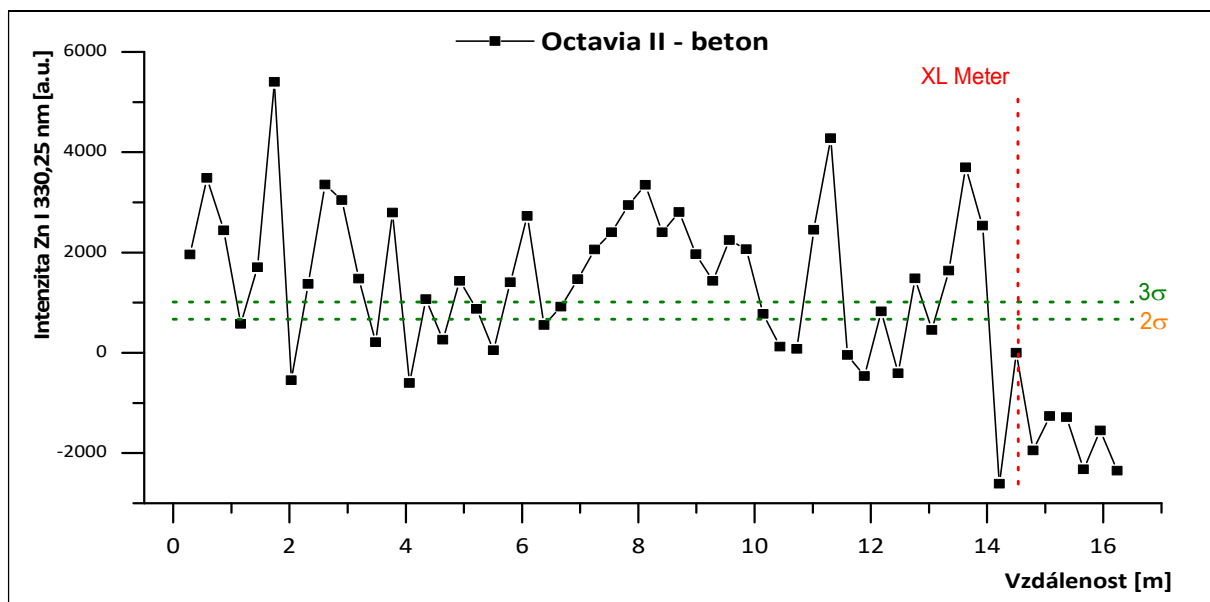
Z pohledu vizuální detekce a identifikace brzdných stop pneumatik na betonovém povrchu jde o triviální úlohu, protože stopy pneumatik jsou obecně výrazně tmavší než betonový povrch a je možné je snadno identifikovat vizuálně. Pro identifikaci stopy na takovém druhu povrchu je obecně zapotřebí pozorovat ji ve směru jejího vzniku, kdy by tato stopa měla být vůči svému okolí co nejkontrastnější, viz **obr. 76** vlevo. Pokud je stopa fotograficky zadokumentována z pohledu proti směru jejího vzniku, pak je optický zisk výrazně nižší, viz **obr. 76** vpravo.

¹²⁵ archiv autora



Obr. 76: Měření č. 1 – Škoda Octavia II, výchozí rychlost 54 km/h, brzdná dráha 14,51 m; vlevo – pohled ve směru brzdění; vpravo – pohled proti směru brzdění¹²⁶

Z pohledu mechanického vzniku stopy je ale způsob shodný s ostatními povrchy – při brzdění dochází k otěru drobných částic pneumatiky, které následně ulpívají na povrchu vozovky. Při detekci těchto stop / částic s využitím přístroje rLIBS tak bylo možné přístroj přesně navádět po jedné z čar předmětné brzdné stopy, takto získané výsledky jsou vyobrazeny na **obr. 77**.



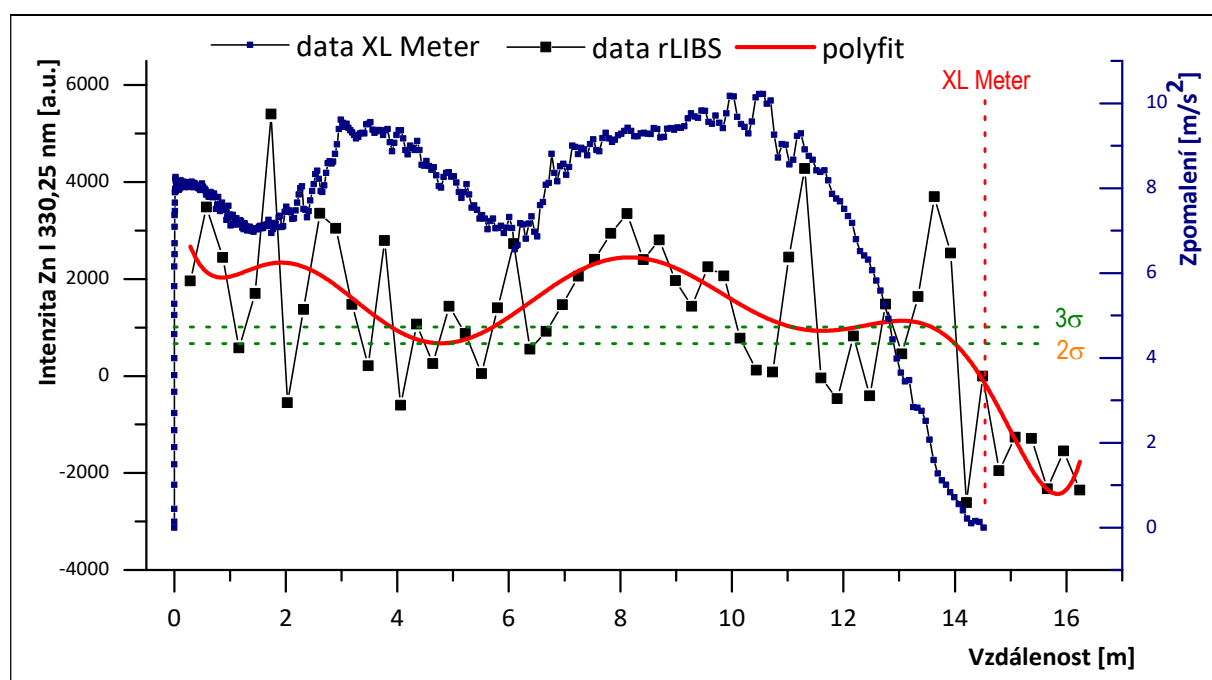
Obr. 77: Detekce brzdné stopy na betonovém povrchu s využitím přístroje rLIBS¹²⁷

¹²⁶ archiv autora

¹²⁷ archiv autora

Z grafu je zřejmé, že bylo dosaženo v porovnání s ostatními měřeními velmi dobrých výsledků. Cílem tohoto experimentu bylo navodit situaci dostatečného množství měřených bodů na brzdě stopě, tj. pokrytí brzdě stopy sítí měřených bodů. Díky přesnějšímu navádění přístroje bylo dosaženo jak vyšších absolutních intenzit Z_n , tak vyššího poměru bodů nad detekčním limitem 3σ v porovnání s ostatními měřeními.

Pro lepší vizualizaci a podobnost s výstupy z přístroje XL Meter byla data získaná pomocí přístroje rLIBS proležena polynomem (na obrázcích označeno jako křivka s názvem polyfit). Porovnání těchto dat je vyobrazeno na následujícím **obr. 78**.



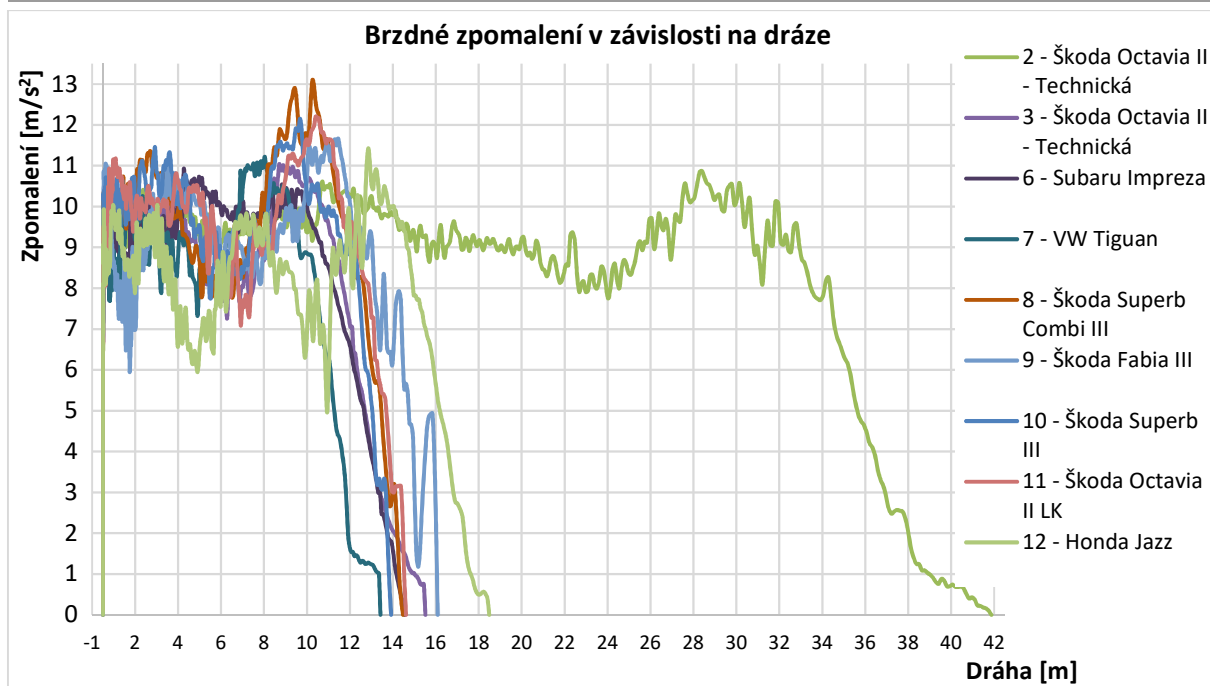
Obr. 78: Měření č. 1 – porovnání dat z měřicích přístrojů rLIBS a XL Meter¹²⁸

Z porovnání získaných dat je patrné, že průběh intenzity Z_n v závislosti na dráze měření pomocí přístroje rLIBS přibližně odpovídá průběhu zpomalení vozidla na dráze měřeného pomocí přístroje XL Meter. Vzhledem k limitům používání vývojové varianty přístroje rLIBS, lze předpokládat, že při rovnoměrnějším rozptýlení měřených bodů po dráze brzdě stopy by bylo dosaženo ještě lepší shody průběhu obou křivek.

7.2 DETEKCE STOP NA MÉNĚ POUŽÍVANÉM ASFALTOVÉM POVRCHU

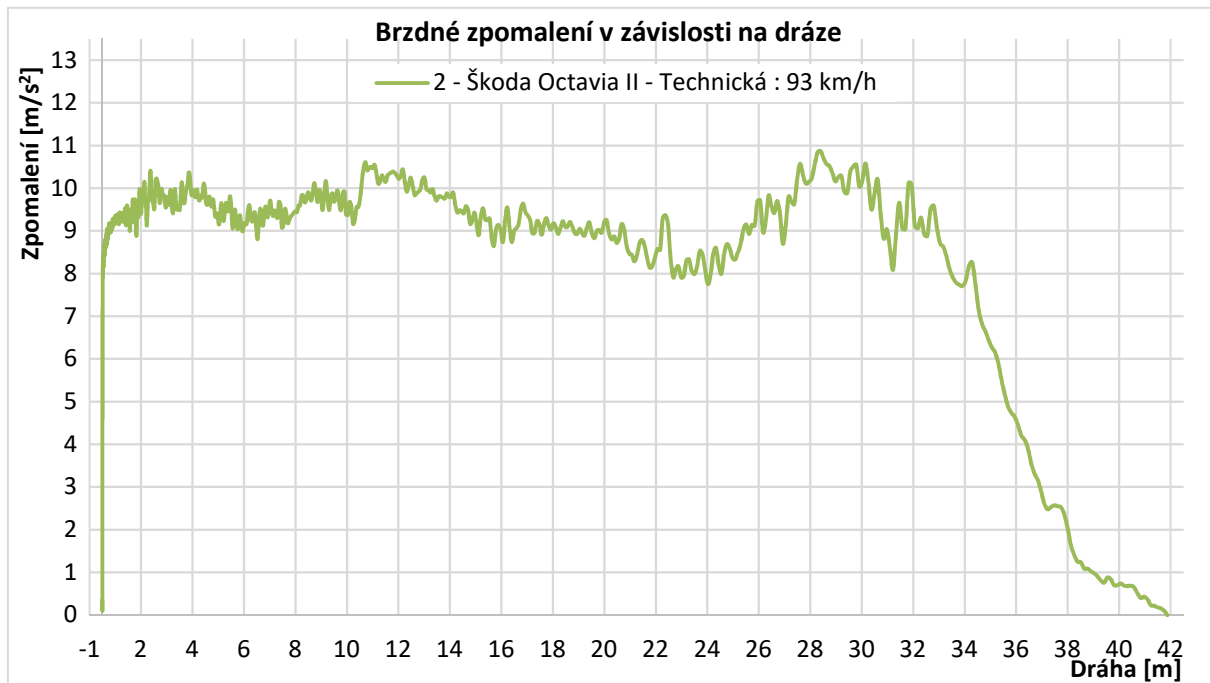
Z důvodu bezpečnosti byla většina provedených experimentů realizována na méně využívané komunikaci na ulici Technická, z uvedených měření se jednalo o měření č. 2, 3, 6 až 12, průběh zpomalení jednotlivých vozidel v závislosti na dráze je patrný z **obr. 79**.

¹²⁸ archiv autora



Obr. 79: Průběh dosaženého brzdného zpomalení při měřeních na méně používaném povrchu ¹²⁹

Při měření č. 2 byla provedena brzdná zkouška s vozidlem Škoda Octavia II z výchozí rychlosti 93 km/h, průměrná hodnota podélného zpomalení vozidla dosáhla hodnoty 8,51 m/s², maximální naměřená hodnota podélného zpomalení vozidla byla 10,87 m/s², průběh dosaženého zpomalení v závislosti na dráze je patrný z **obr. 80**.



Obr. 80: Průběh dosaženého brzdného zpomalení při měření č. 2 ¹³⁰

¹²⁹ archiv autora

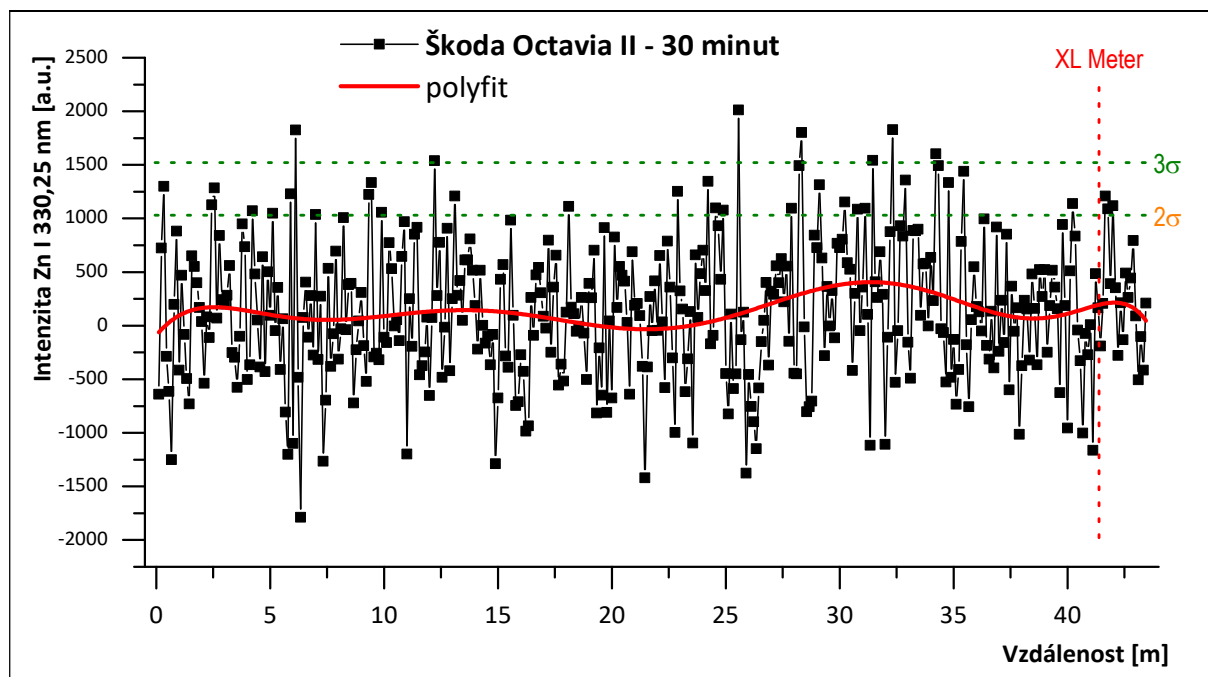
¹³⁰ archiv autora

Brzdné stopy předních kol vozidla Škoda Octavia po měření č. 2 byly vizuálně velmi slabě zřetelné při pohledu ve směru jejich vytvoření a současně malém úhlu pozorování, viz **obr. 81**.



Obr. 81: Fotograficky zadokumentované brzdné stopy po měření č. 2; vlevo – pohled proti směru jejich vzniku; vpravo – pohled po směru jejich vzniku ¹³¹

Při pohledu ve směru vytvořených stop se jako opticky výraznější jevila stopa po levém předním kole vozidla, naopak při pohledu proti směru vzniku stop se jako opticky výraznější jevila stopa pravého předního kola. Bezprostředně po fotodokumentaci byla provedena dokumentace stopy pravého předního kola pomocí přístroje rLIBS, získaná data, včetně detekčních limitů jsou uvedena na **obr. 82**. Začátek dokumentace stopy pomocí rLIBS byl cca 20 minut po jejím vzniku, časová náročnost dokumentace stopy – 10 minut.



Obr. 82: Dokumentace brzdné stopy pravého předního kola vozidla Škoda Octavia II při měření č. 2 ¹³²

¹³¹ archiv autora

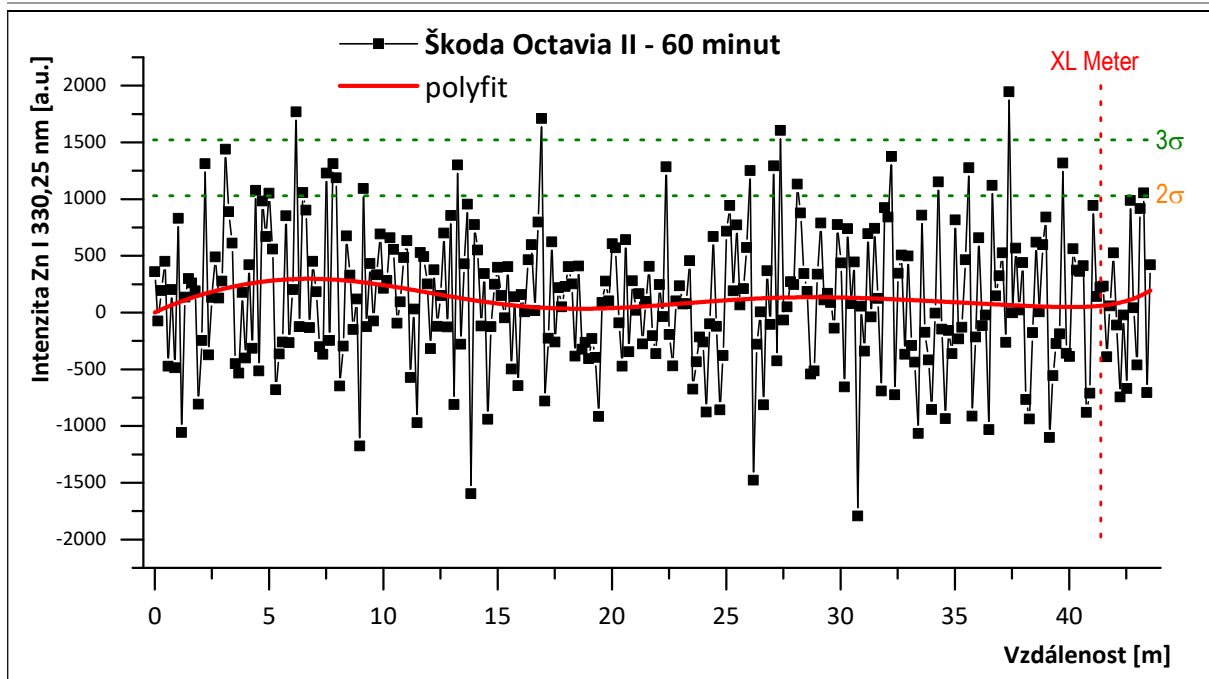
¹³² archiv autora

Jak je z rozložení bodů patrné, v bezprostřední blízkosti a nad detekčním limitem 3σ se nacházelo několik bodů (každý průměřovaný z 10 jednotlivých měření) v průběhu brzdné dráhy. Několik bodů nad detekčním limitem 2σ bezprostředně za koncem brzdné dráhy dle přístroje XL Meter lze přisoudit nekonzistentnímu rozložení měřicích bodů po brzdné dráze – pro vyobrazení byla celková zadokumentovaná dráha rozdělena na ideální konstantní kroky, ale reálné rozmístění bodů takto konstantní nebylo. Křivka proložená body pak vykazuje určité podobné znaky jako křivka dosaženého zpomalení, např. pokles hodnot v oblasti okolo 20. metru brzdné dráhy a také lokální maximum hodnot v oblasti kolem 32. metru brzdné dráhy.

Významným faktorem ovlivňujícím možnosti detekce stopy vozidla na vozovce je degradace této stopy, ať už vlivem atmosférických podmínek (chladnutí, odfouknutí či odplavení) či mechanickou cestou („rozježdění“, překrytí apod.). Degradaci stopy není možné zabránit, bylo tedy nutné ověřit, jak moc je využití rLIBS závislé na degradaci stopy. Za tímto účelem byly brzdné stopy opakovaně dokumentovány s časovým odstupem 30 minut. Byly zkoumány dvě varianty degradace: pozvolná – pouze vliv atmosférických podmínek (mírný vánek); zvýšená – vliv atmosférických podmínek + významný pohyb vozidel (osobní vozidla + autobusy, min. 3x za 5 minut) a chodců přes dokumentované stopy.

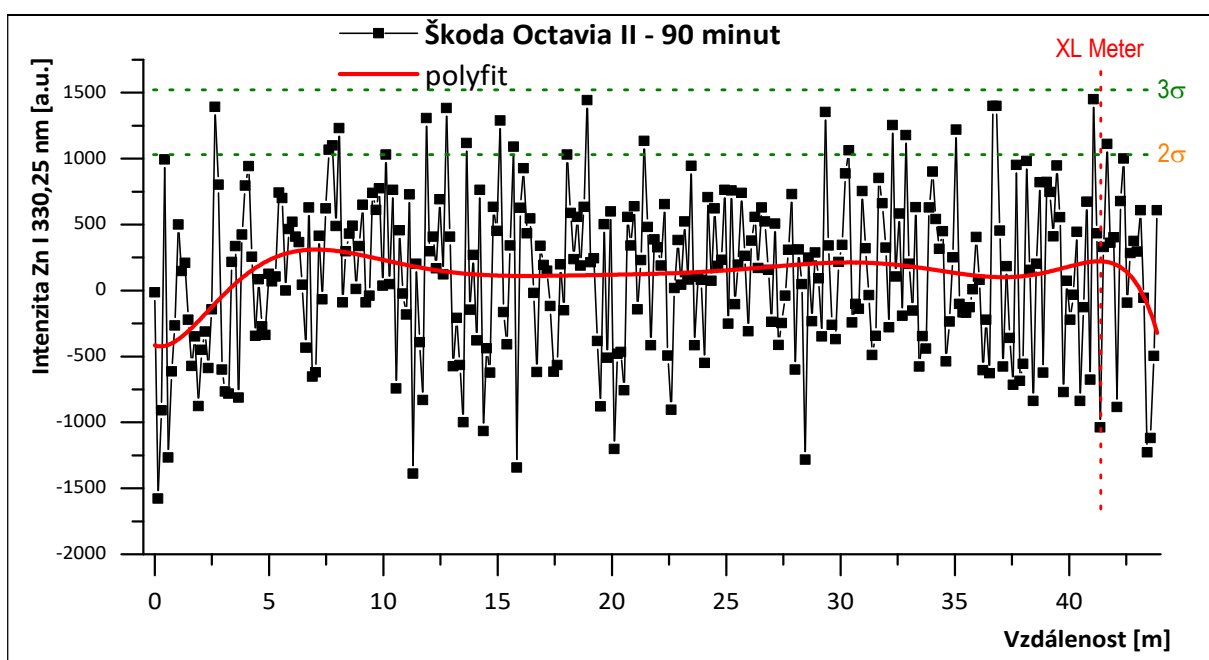
7.2.1 Degradace stopy – pozvolná

Zkoumání vlivu pozvolné degradace brzdné stopy na výsledky její dokumentace pomocí rLIBS bylo realizováno při měřeních č. 2 až 5 a 12. Rozdílnost naměřených dat při jednotlivých časově odstupňovaných dokumentacích brzdné stopy měření č. 2 je patrná z **obr. 83.** až **obr. 85.**



Obr. 83: Dokumentace brzdné stopy vozidla Škoda Octavia II při měření č. 2, 60 min. po jejím vzniku ¹³³

Porovnáním absolutního počtu bodů v bezprostřední blízkosti a nad detekčním limitem 3σ na **obr. 83** s množstvím, zaznamenaným po 30 minutách na **obr. 82**, je zřejmý pokles. Výskyt bodů nad detekčními limity však stále umožňuje odlišit oblast brzdné stopy pneumatiky.



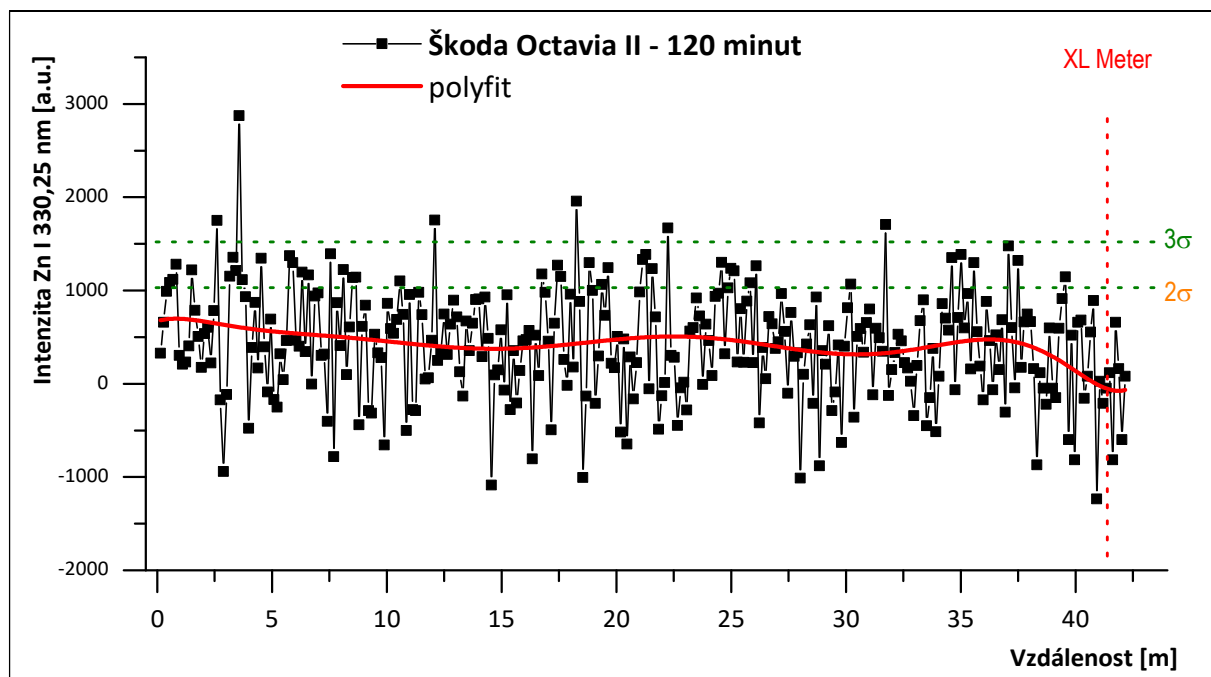
Obr. 84: Dokumentace brzdné stopy vozidla Škoda Octavia II při měření č. 2, 90 min. po jejím vzniku ¹³⁴

Porovnáním naměřených hodnot s předešlými **obr. 82** a **obr. 83** je opět zřejmý pokles jak absolutních naměřených hodnot, tak četnosti výskytu bodů nad detekčním limitem 2σ , viz **obr. 84**.

¹³³ archiv autora

¹³⁴ archiv autora

Množství bodů nad detekčním limitem 2σ a poblíž limitu 3σ i v tomto případě umožňuje odlišit oblast brzdné stopy pneumatiky.



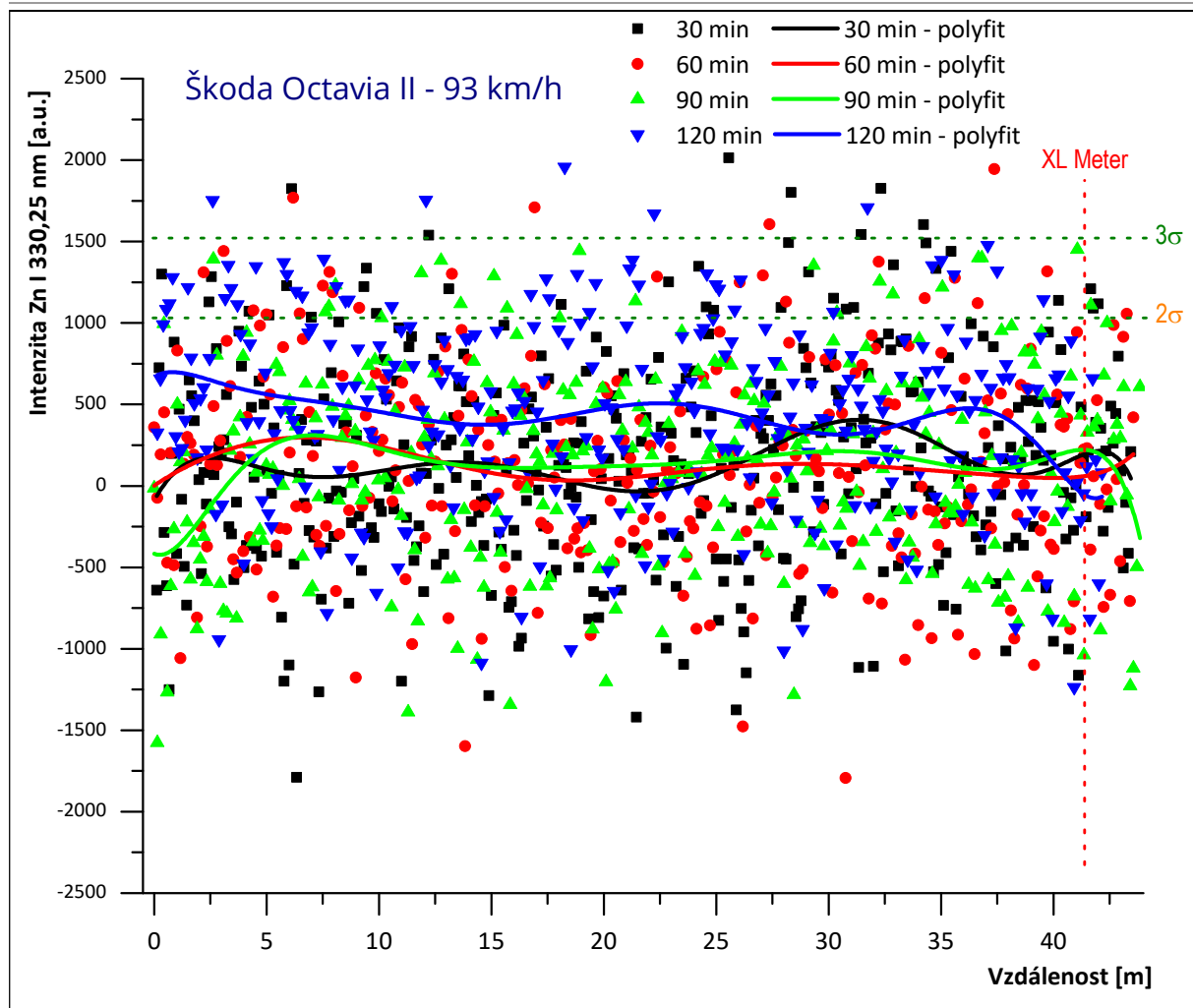
Obr. 85: Dokumentace brzdné stopy vozidla Škoda Octavia II při měření č. 2, 120 min. po vzniku ¹³⁵

Porovnáním naměřených hodnot s předešlými **obr. 83** a **obr. 84** je zřejmý nárůst hodnot i výskyt bodů nad detekčním limitem 3σ , oproti očekávanému poklesu, viz **obr. 85**. Na základě výskytu bodů nad detekčními limity by tak i v tomto případě bylo možné odlišit oblast brzdné stopy pneumatiky.

Na základě vyhodnocení a porovnání získaných dat, tak není možné určit vliv pozvolné degradace na možnost detekce brzdné stopy pomocí rLIBS. Při současném způsobu směru dat, tj. ručním navádění přístroje po stopě s nekonstantním rozmístěním měřicích bodů, je vliv metodiky měření výrazně vyšší než vliv degradace stopy na získané výsledky.

Porovnání naměřených dat všech provedených měření brzdné stopy pravého předního kola vozidla Škoda Octavia při měření č. 2 je vyobrazeno na **obr. 86**.

¹³⁵ archiv autora



Obr. 86: Dokumentace brzděné stopy vozidla Škoda Octavia II 30, 60, 90 a 120 minut po jejím vzniku¹³⁶

Naměřené maximální hodnoty nad detekčním limitem 3σ i po 120 minutách od vytvoření brzděné stopy, ale nevylučují možnost, že reálný vliv pozvolné degradace na možnost detekce pomocí rLIBS je minimální například v porovnání možnosti fotografické dokumentace, kdy po 120 minutách nebyla brzděná stopy prakticky dokumentovatelná, viz **obr. 87**.

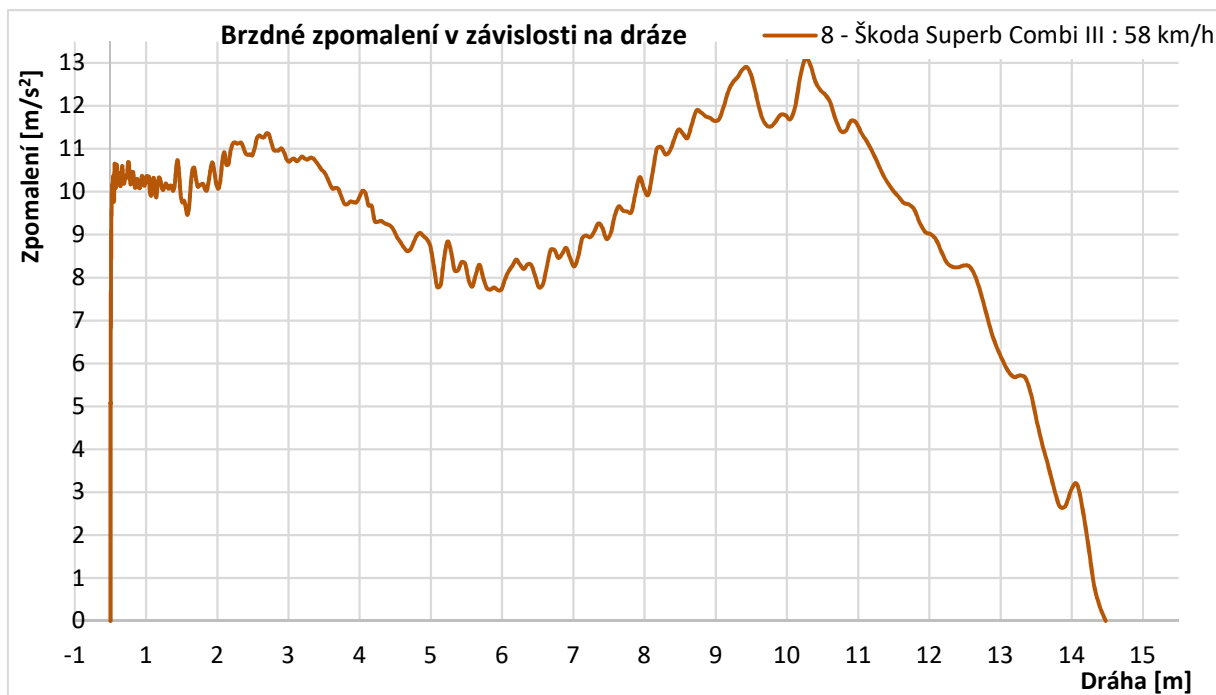
¹³⁶ archiv autora



Obr. 87: Fotograficky zadokumentované brzdné stopy po měření č. 2 po 120 minutách ¹³⁷

7.2.2 Degradace stopy – zvýšená

Zkoumání vlivu zvýšené degradace brzdné stopy (především jejím přejížděním osobními vozidly a autobusy) na výsledky její dokumentace pomocí rLIBS bylo realizováno při měřeních č. 6 až 11. Při měření č. 8 byla provedena brzdná zkouška s vozidlem Škoda Superb III Combi z výchozí rychlosti 58 km/h, průměrná hodnota podélného zpomalení vozidla dosáhla hodnoty 9,40 m/s², maximální naměřená hodnota podélného zpomalení vozidla byla 13,10 m/s², průběh dosaženého zpomalení v závislosti na dráze je patrný z **obr. 88**.

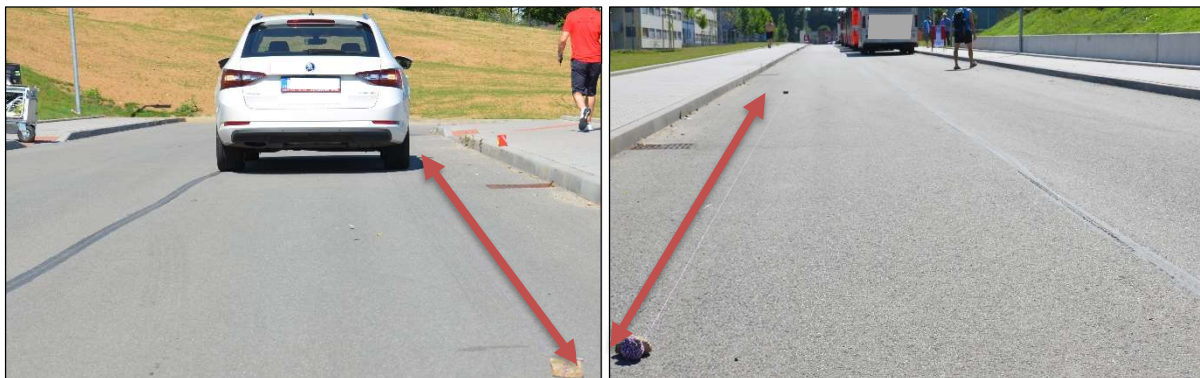


Obr. 88: Průběh dosaženého brzdného zpomalení při měření č. 8 ¹³⁸

¹³⁷ archiv autora

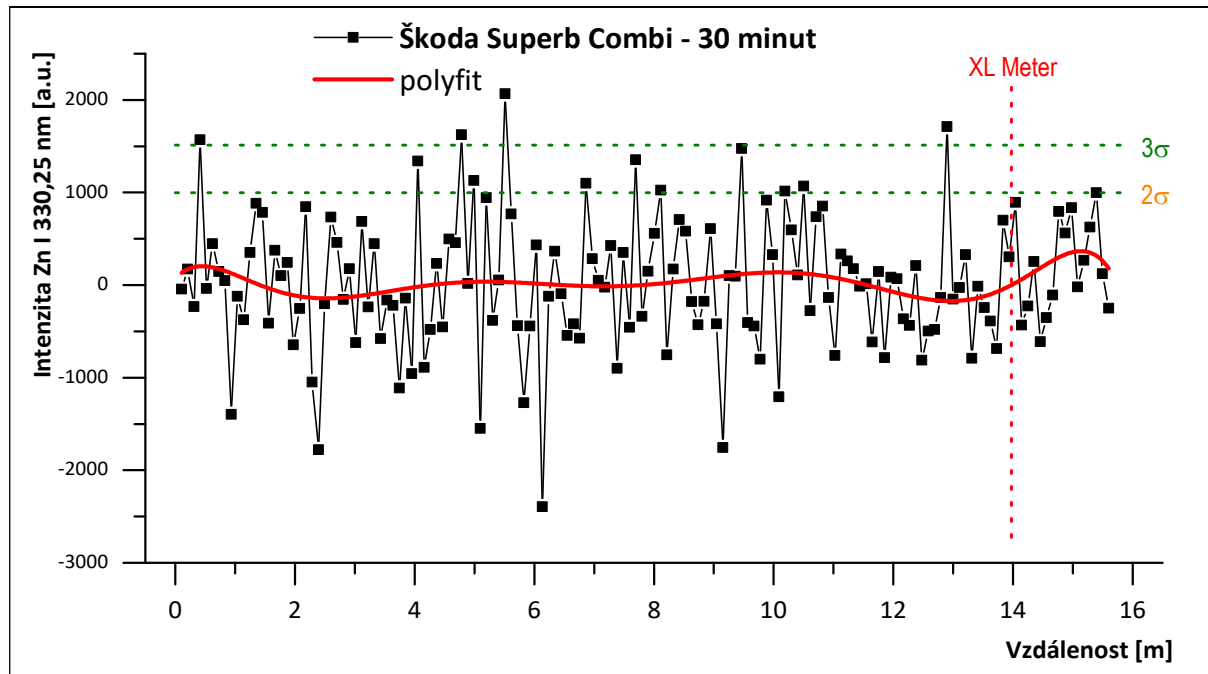
¹³⁸ archiv autora

Brzdné stopy předních kol vozidla Škoda Superb III Combi po měření č. 8 byly vizuálně velmi slabě pouze při pohledu ve směru jejich vytvoření a současně malém úhlu pozorování, při pozorování proti směru jejich vzniku byly stopy vizuálně neidentifikovatelné, viz **obr. 89**.



Obr. 89: Fotograficky zadokumentované brzdné stopy po měření č. 8; vlevo – pohled ve směru jejich vzniku; vpravo – pohled proti směru jejich vzniku ¹³⁹

Pro dokumentaci byla zvolena brzdná stopa pravého předního kola z důvodu výskytu levé stopy na středovém spoji vozovky. Bezprostředně po fotodokumentaci byla provedena dokumentace stopy pomocí přístroje rLIBS, získaná data, včetně detekčních limitů, jsou uvedena na **obr. 90**. Začátek dokumentace stopy pomocí rLIBS byl cca 25 minut po jejím vzniku, časová náročnost dokumentace stopy – 5 minut.

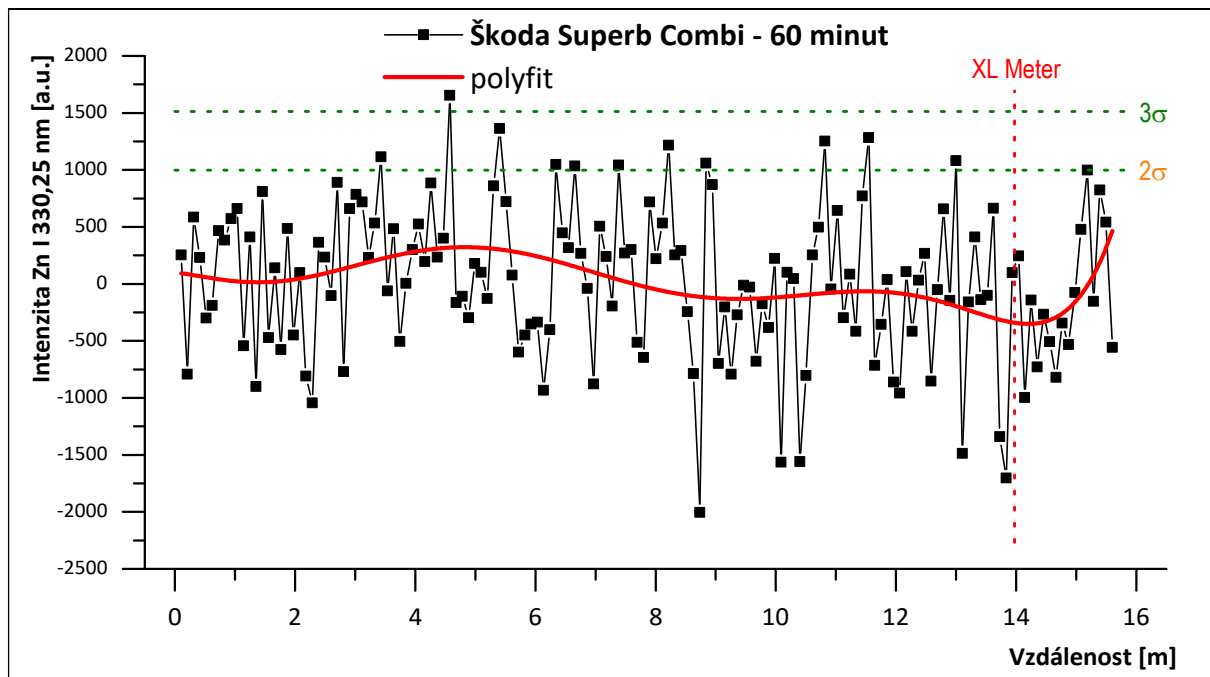


Obr. 90: Dokumentace brzdné stopy vozidla Škoda Superb III Combi při měření č. 8 ¹⁴⁰

¹³⁹ archiv autora

¹⁴⁰ archiv autora

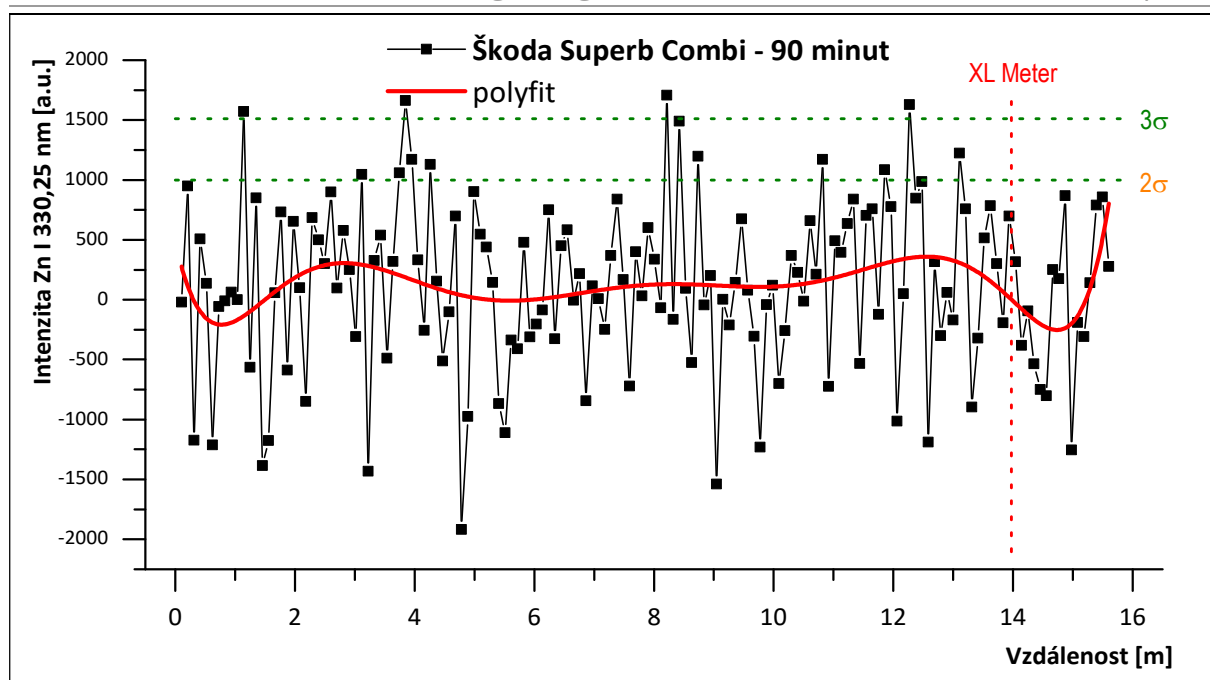
Četnost bodů nad detekčními limity na předchozím **obr. 90** není nijak vysoká, nicméně samotný výskyt těchto bodů v oblasti brzdné stopy by umožnil odlišit oblast brzdné stopy pneumatiky. Křivka proložená body opět vykazuje určité podobné znaky jako křivka dosaženého zpomalení, např. lokální maximum hodnot v oblasti kolem 11. metru brzdné dráhy. Nárůst hodnot ve vzdálenosti 15 m od počátku brzdné stopy lze přisoudit detekci stopy z předcházejícího měření.



Obr. 91: Dokumentace brzdné stopy vozidla Superb III Combi při měření č. 8, 60 min. po vzniku ¹⁴¹

Porovnáním absolutního počtu bodů v bezprostřední blízkosti a nad detekčním limitem 3σ s množstvím zaznamenaným po 30 minutách, viz **obr. 91**, je zřejmý značný pokles. Proložená křivka vykazuje podobné znaky jako křivka zpomalení, např. lokální maxima hodnot v oblasti kolem 4. a 11. metru brzdné dráhy. Výskyt bodů nad detekčními limity umožňuje odlišení brzdné stopy pneumatiky.

¹⁴¹ archiv autora

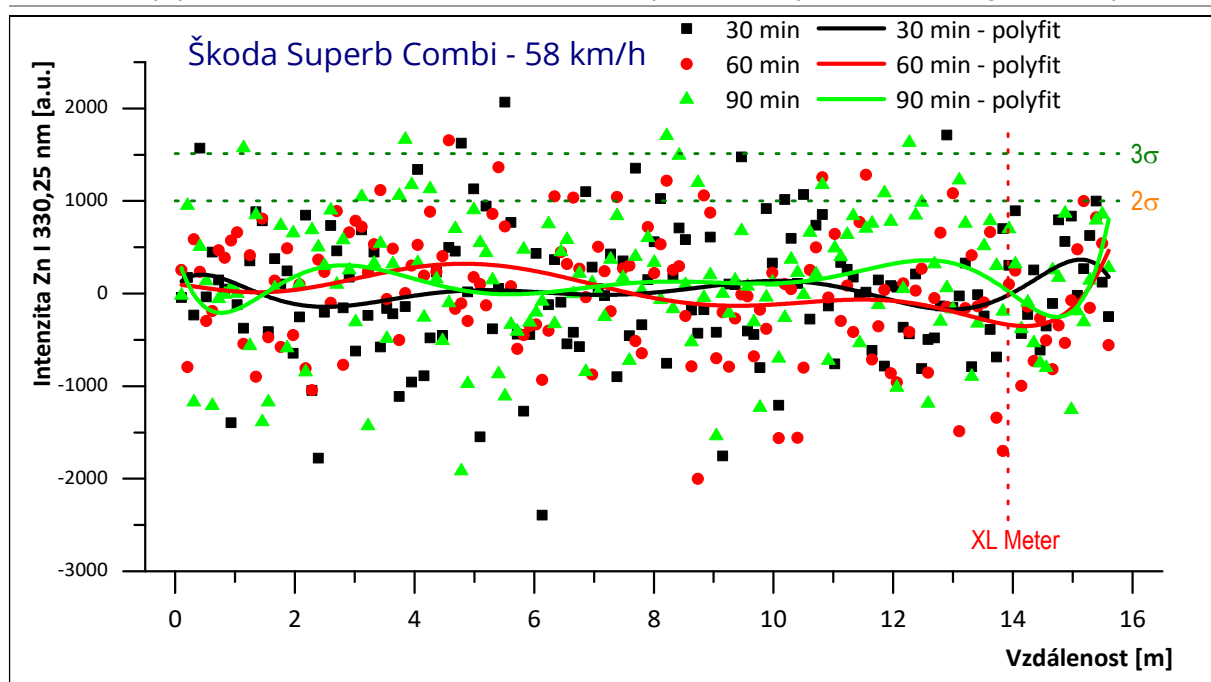


Obr. 92: Dokumentace brzdné stopy vozidla Superb III Combi při měření č. 8, 90 min. po vzniku ¹⁴²

Obdobně jako v předchozí kapitole, i v tomto případě byl namísto očekávaného poklesu zaznamenán nárůst naměřených intenzit i vyšší výskyt bodů nad detekčním limitem 3σ , viz **obr. 92**, i přes delší časový odstup od vzniku stopy a tím vyšší pravděpodobnost její degradace. Proložená křivka opět vykazuje podobné znaky jako křivka zpomalení, např. lokální maxima hodnot v oblasti kolem 3. a 12. metru brzdné dráhy. Na základě výskytu bodů nad detekčními limity by tak i v tomto případě bylo možné odlišit oblast brzdné stopy pneumatiky. Shodně jako v předchozí kapitole lze konstatovat, že vliv užití metodiky měření je, i přes všechnu snahu jej co nejvíce eliminovat, výrazně je vyšší než vliv degradace stopy na získané výsledky.

Porovnání naměřených dat všech provedených měření brzdné stopy pravého předního kola vozidla Škoda Superb III Combi při měření č. 8 je vyobrazeno na **obr. 93**.

¹⁴² archiv autora



Obr. 93: Dokumentace brzdné stopy vozidla Škoda Superb III Combi 30, 60 a 90 min. po vzniku ¹⁴³

Fotografická dokumentace brzdných stop 90 minut po jejich vytvoření byla prakticky nerealizovatelná, viz **obr. 94**, z pohledu vizuální rozpoznatelnosti tak lze hovořit o „zmizení“ stopy.



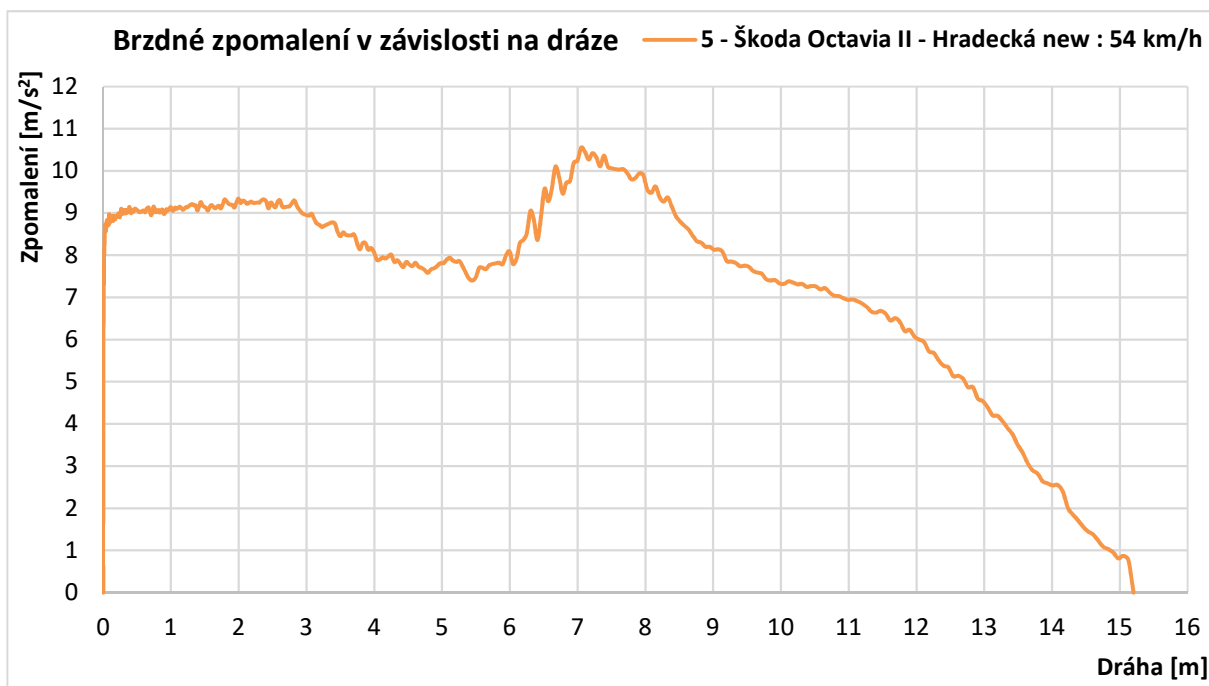
Obr. 94: Fotograficky zadokumentovaná oblast brzdné stopy po měření č. 8 po 90 minutách ¹⁴⁴

¹⁴³ archiv autora

¹⁴⁴ archiv autora

7.3 DETEKCE STOP NA NOVÉM POVRCHU

Při měření č. 5 byla provedena na ulici Hradecká na nově položeném nepoužívaném povrchu brzdná zkouška s vozidlem Škoda Octavia II z výchozí rychlosti 56 km/h, průměrná hodnota podélného zpomalení vozidla dosáhla hodnoty $7,73 \text{ m/s}^2$, maximální naměřená hodnota podélného zpomalení vozidla byla $10,55 \text{ m/s}^2$, průběh dosaženého zpomalení v závislosti na dráze je patrný z **obr. 95**.



Obr. 95: Průběh dosaženého brzdného zpomalení při měření č. 5 na novém povrchu ¹⁴⁵

Brzdné stopy předních kol vozidla Škoda Octavia po měření č. 5 byly vizuálně slabě zřetelné především při pohledu ve směru jejich vytvoření a současně malém úhlu pozorování, viz **obr. 96**.

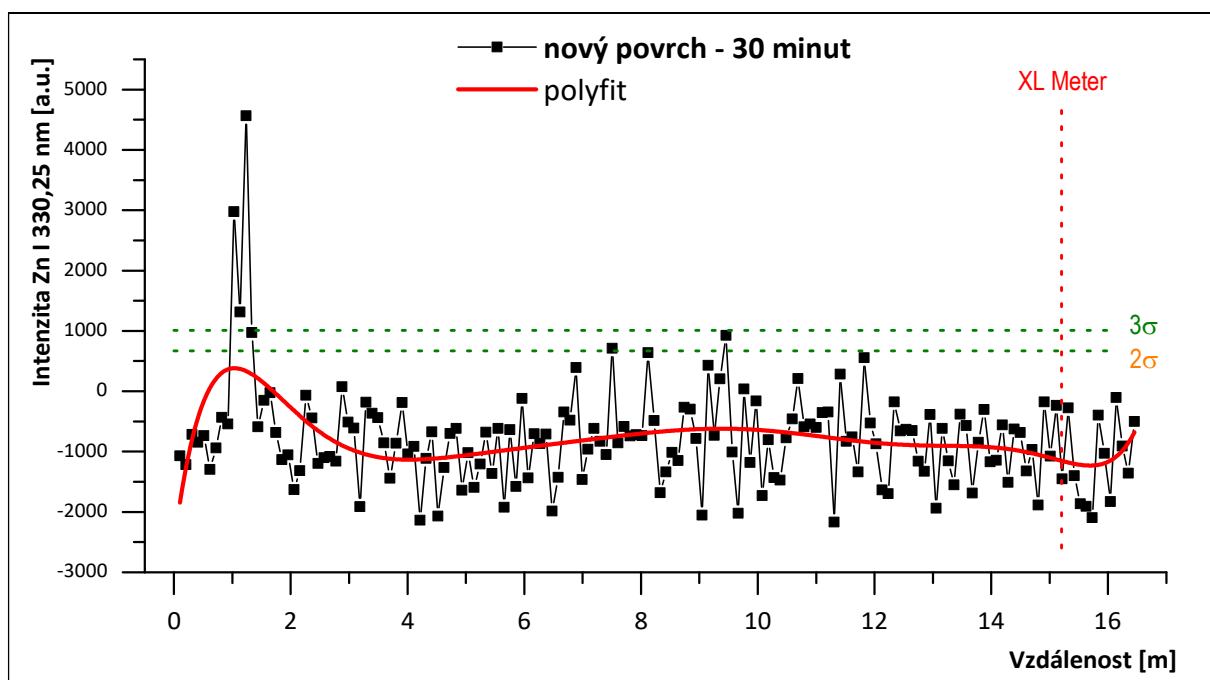


Obr. 96: Fotograficky zadokumentované brzdné stopy po měření č. 5; vlevo – pohled po směru jejich vzniku; vpravo – pohled proti směru jejich vzniku ¹⁴⁶

¹⁴⁵ archiv autora

¹⁴⁶ archiv autora

Při pohledu ve směru vytvořených stop při malém úhlu pozorování se v pravé stopě vyskytovaly dvě zřetelnější části, na **obr. 96** vyznačeny červenou barvou. Při pohledu proti směru vzniku stop byly stopy vizuálně prakticky nerozpoznatelné. Bezprostředně po fotodokumentaci byla provedena dokumentace stopy pravého předního kola pomocí přístroje rLIBS, získaná data, včetně detekčních limitů, jsou uvedena na **obr. 97**. Začátek dokumentace stopy pomocí rLIBS byl cca 25 minut po jejím vzniku, časová náročnost dokumentace stopy – 5 minut.



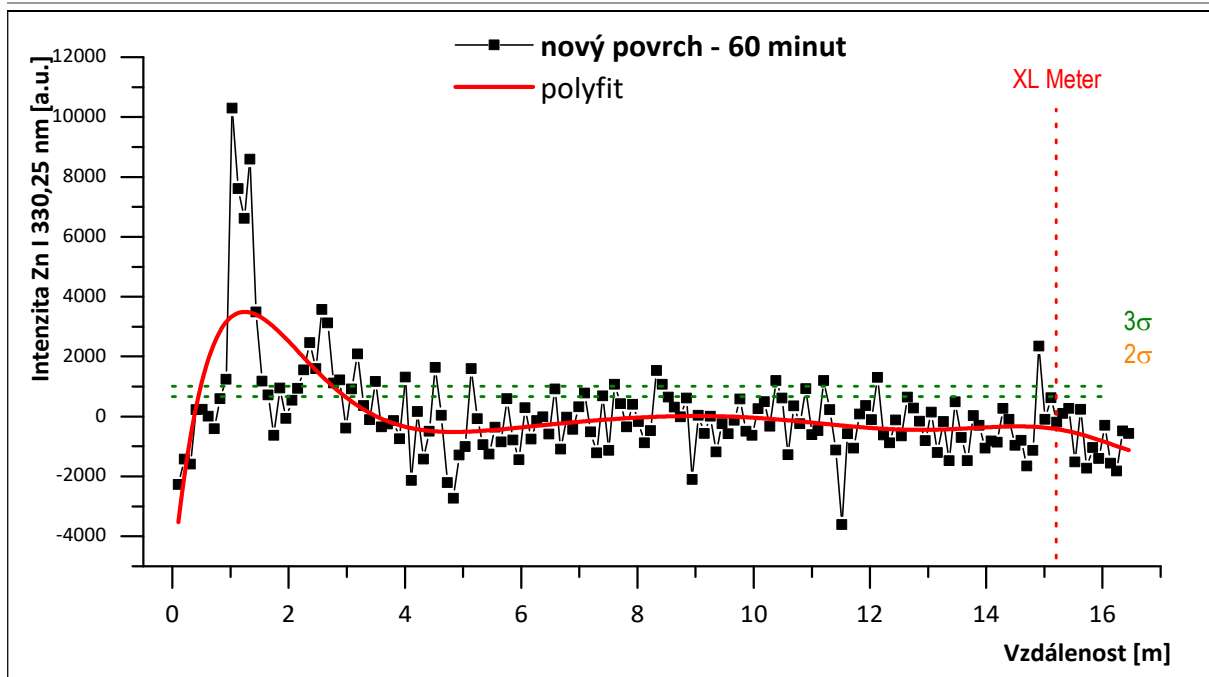
Obr. 97: Dokumentace brzdné stopy pravého předního kola vozidla Škoda Octavia II při měření č. 5 ¹⁴⁷

Jak je z rozložení bodů patrné, v bezprostřední blízkosti a nad detekčním limitem 2σ se nacházelo pouze několik bodů v průběhu brzdné dráhy. Naměřené vysoké intenzity v oblasti 1. metru brzdné stopy odpovídají částem blokovací stopy vyznačeným na **obr. 96**. Na základě naměřených hodnot lze konstatovat, že vizuální zřetelnost stop nebyla způsobena obvyklým otěrem pneumatiky o vozovku, ale patrně „setřením svrchního filmu“, který zůstal na povrchu vozovky po jeho pokládce.

7.3.1 Degradace stopy – pozvolná

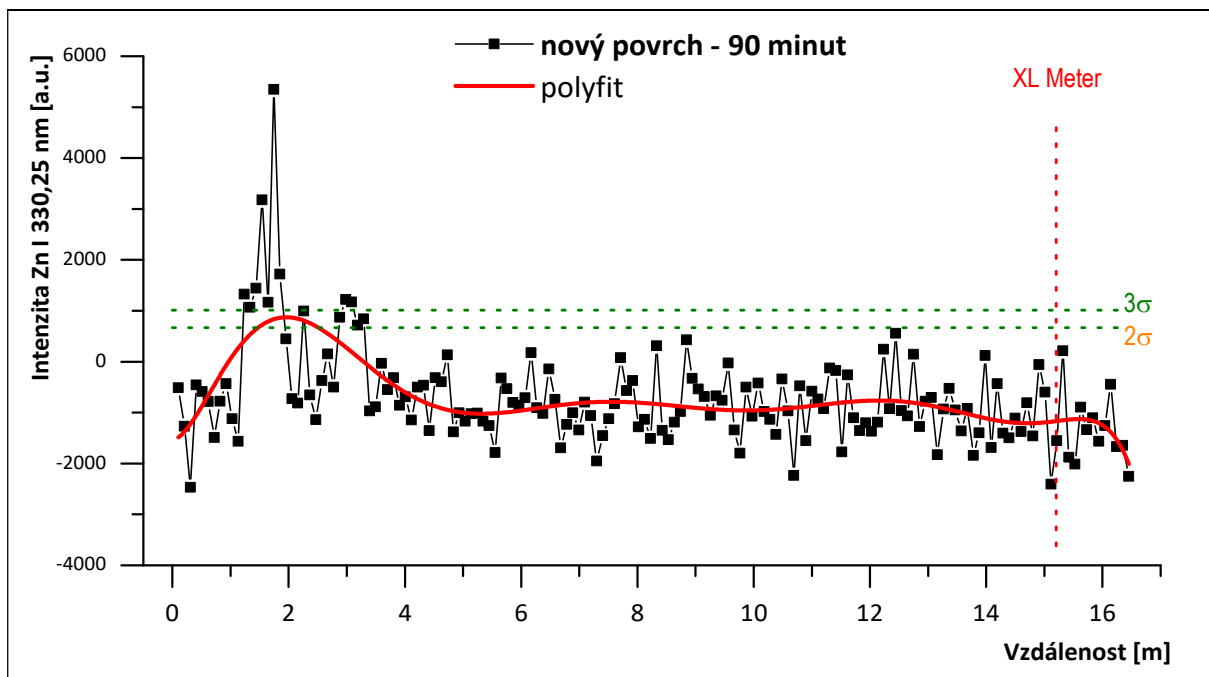
Zkoumání vlivu pozvolné degradace brzdné stopy na výsledky její dokumentace pomocí rLIBS bylo realizováno pomocí sady měření s časovým odstupem. Rozdílnost naměřených dat při jednotlivých časově odstupňovaných dokumentacích brzdné stopy pravého předního kola vozidla Škoda Octavia II po měření č. 5 je patrná z **obr. 98** až **obr. 101**.

¹⁴⁷ archiv autora



Obr. 98: Dokumentace brzdné stopy vozidla Škoda Octavia II při měření č. 5, 60 minut po vzniku ¹⁴⁸

Porovnáním absolutního počtu bodů v bezprostřední blízkosti a nad detekčními limity 2σ i 3σ s množstvím zaznamenaným po 30 minutách, je zřejmý poměrně významný nárůst. Tento nárůst lze vysvětlit přesnějším naváděním měřicího přístroje rLIBS po trajektorii brzdné stopy. Výskyt bodů nad detekčními limity umožňuje odlišit oblast brzdné stopy pneumatiky.

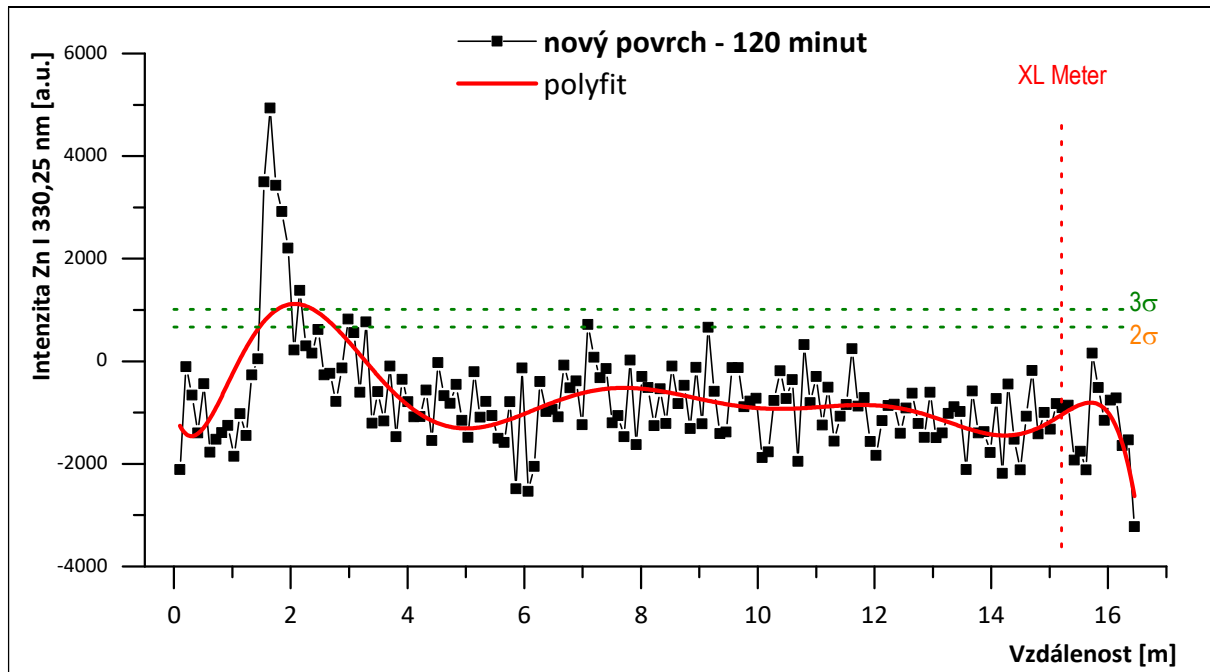


Obr. 99: Dokumentace brzdné stopy vozidla Škoda Octavia II při měření č. 5, 90 minut po vzniku ¹⁴⁹

¹⁴⁸ archiv autora

¹⁴⁹ archiv autora

Porovnáním naměřených hodnot s předešlým **obr. 98** je zřejmý pokles jak absolutních naměřených hodnot, tak četnosti výskytu bodů nad detekčním limitem 2σ . Množství bodů nad detekčním limitem 2σ a poblíž limitu 3σ v tomto případě neumožňuje odlišení oblasti brzdné stopy pneumatiky.

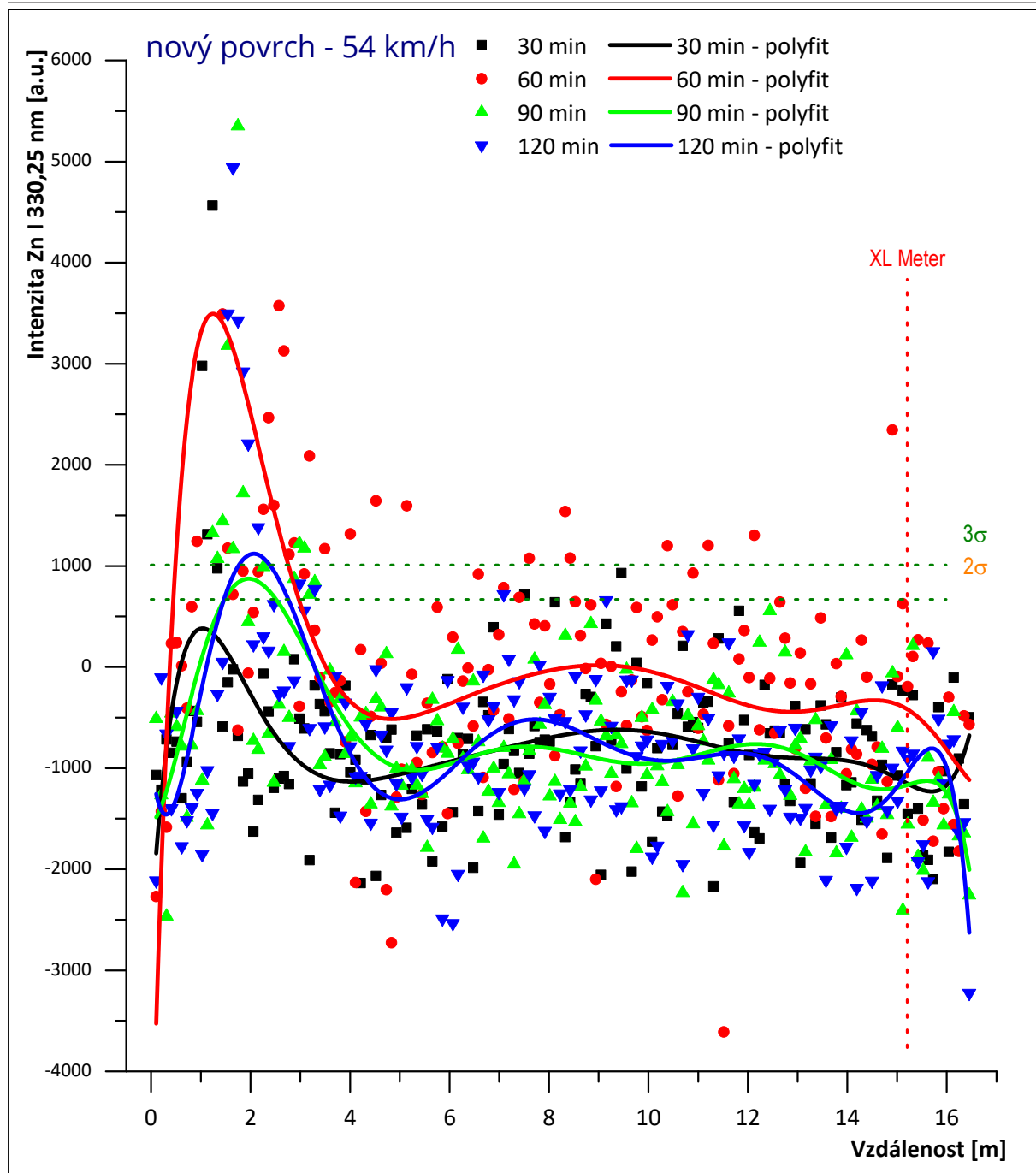


Obr. 100: Dokumentace brzdné stopy vozidla Škoda Octavia II při měření č. 5, 120 minut po vzniku ¹⁵⁰

Porovnáním naměřených hodnot s předešlým **obr. 99** je opět zřejmý pokles hodnot i výskytu bodů nad detekčním limitem 2σ i 3σ . Na základě výskytu bodů pod detekčními limity by tak i v tomto případě nebylo možné odlišit oblast brzdné stopy pneumatiky.

Porovnání naměřených dat všech provedených měření brzdné stopy pravého předního kola vozidla Škoda Octavia při měření č. 5 je vyobrazeno na **obr. 101**

¹⁵⁰ archiv autora



Obr. 101: Dokumentace brzdné stopy vozidla Škoda Octavia II 30, 60, 90 a 120 min. po jejím vzniku ¹⁵¹

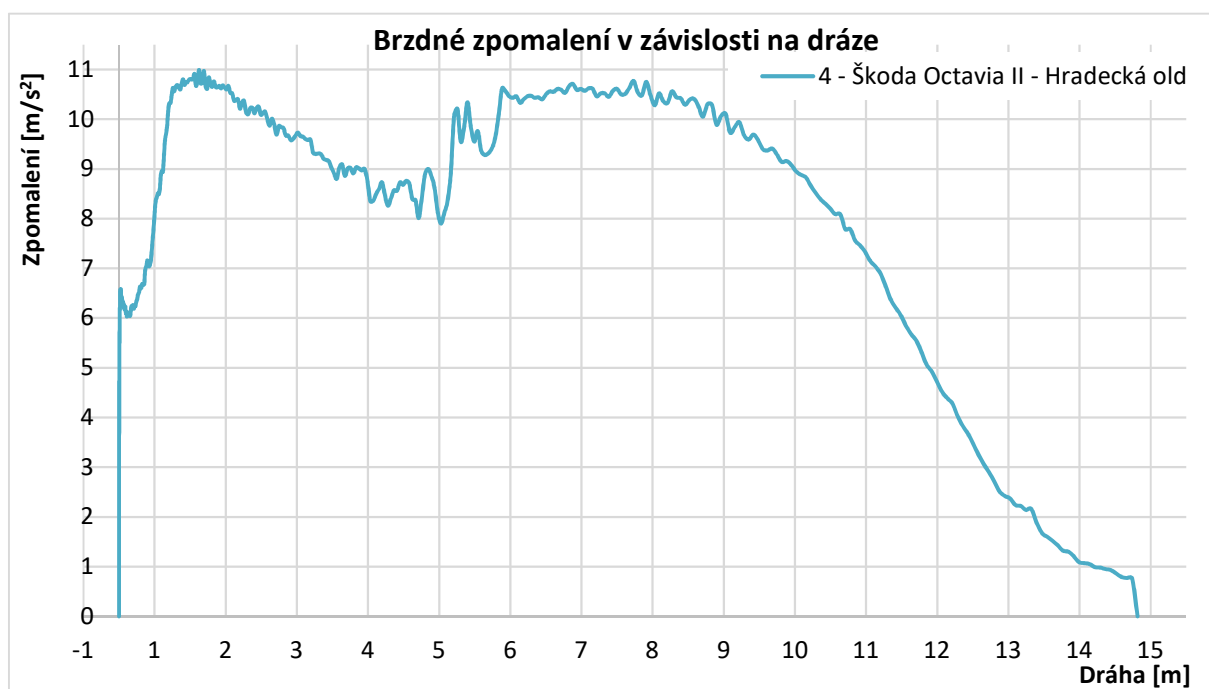
Na základě hodnot naměřených s časovým odstupem a jejich porovnáním s hodnotami získanými na ostatních površích lze konstatovat, že v předmětném případě nebyla vizuální zřetelnost brzdných stop způsobena obvyklými otěry pneumatiky na vozovce, ale otěrem povrchu vozovky pneumatikou.

¹⁵¹ archiv autora

7.4 DETEKCE STOP NA FREKVENTOVANÉM POVRCHU

Pilotní měření na frekventovaném povrchu byla provedena v roce 2015 na ulici Tovární a na účelových komunikacích na autodromu v Brně. Při měřeních se plně projevila náchylnost metody na přesné „zaostření“ a „kopírování reliéfu povrchové vrstvy“. Zisk upotřebitelných a využitelných dat byl prakticky minimální, přesto výsledkem měření byla hardwarová úprava speciálního přípravku měřicího přístroje rLIBS, díky které bylo možné realizovat měření v roce 2016 s výrazně lepším výsledkem.

Při měření č. 4 byla provedena na ulici Hradecká, na frekventovaném povrchu bezprostředně před jeho renovací (měření realizováno v odstavném pruhu, který byl minimálně 2 měsíce před měřením využíván pro provoz vozidel), brzdná zkouška s vozidlem Škoda Octavia II z výchozí rychlosti 54 km/h, průměrná hodnota podélného zpomalení vozidla dosáhla hodnoty 7,87 m/s², maximální naměřená hodnota podélného zpomalení vozidla byla 10,99 m/s². Průběh dosaženého zpomalení v závislosti na dráze je patrný z **obr. 102**.



Obr. 102: Průběh dosaženého brzdného zpomalení při měření č. 4 na starém povrchu ¹⁵²

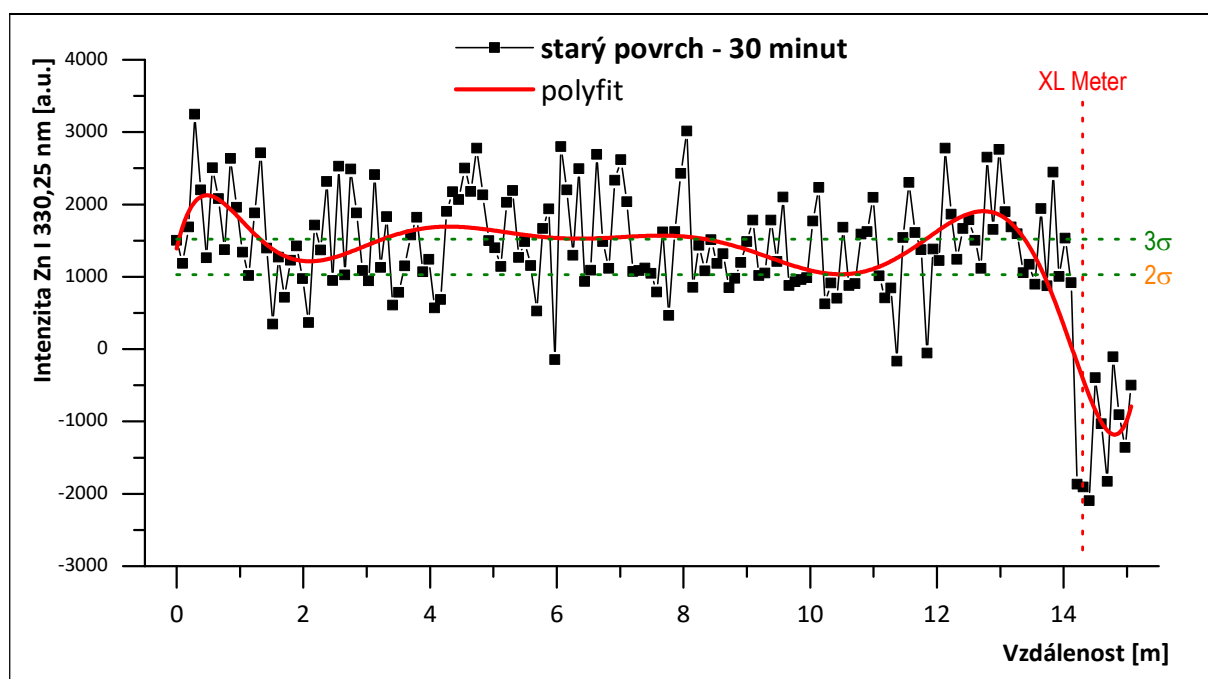
Brzdné stopy předních kol vozidla Škoda Octavia po měření č. 4 byly vizuálně slabě zřetelné především při pohledu ve směru jejich vytvoření a současně malém úhlu pozorování, viz **obr. 103**.

¹⁵² archiv autora



Obr. 103: Fotograficky zadokumentované brzdné stopy po měření č. 4; vlevo – pohled po směru jejich vzniku; vpravo – pohled proti směru jejich vzniku

Při pohledu ve směru vytvořených stop při malém úhlu pozorování se v pravé stopě vyskytovala zřetelnější část, na **obr. 103** vyznačena červenou barvou. Při pohledu proti směru vzniku stop byla vizuální rozpoznatelnost stop výrazně horší. Bezprostředně po fotodokumentaci byla provedena dokumentace stopy pravého předního kola pomocí přístroje rLIBS. Získaná data, včetně detekčních limitů jsou uvedena na následujícím obrázku. Začátek dokumentace stopy pomocí rLIBS byl cca 25 minut po jejím vzniku, časová náročnost dokumentace stopy – 5 minut.



Obr. 104: Dokumentace brzdné stopy pravého předního kola vozidla Škoda Octavia II při měření č. 4¹⁵³

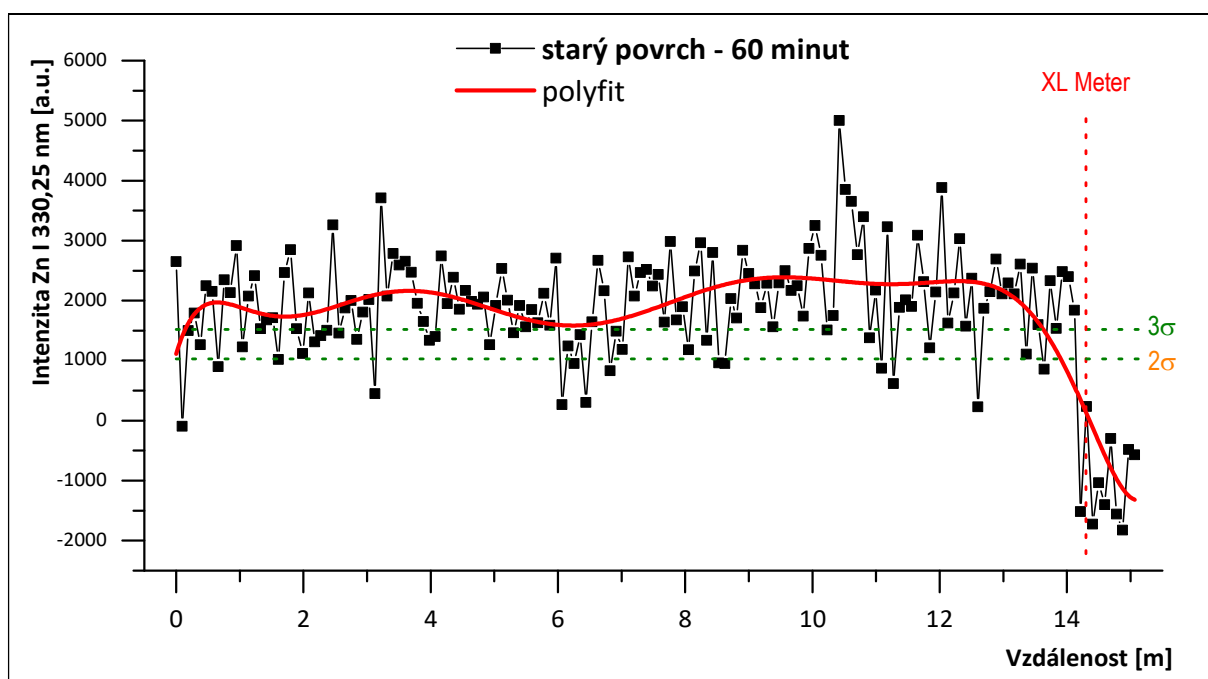
Z rozložení bodů na předchozím obrázku v porovnání s předchozími měřeními je patrné, že bylo dosaženo velmi dobrých výsledků – vysoké procento bodů se nachází nad detekčními limity po celé délce brzdné stopy. Po konci brzdné stopy následuje výrazný pokles hodnot – stop, tj. jasně

¹⁵³ archiv autora

rozpoznatelný konec brzdné stopy. V porovnání s detekcí na betonovém povrchu neodpovídá křivka proložená hodnotami křivce průběhu zaznamenaného zpomalení.

7.4.1 Degradace stopy – pozvolná

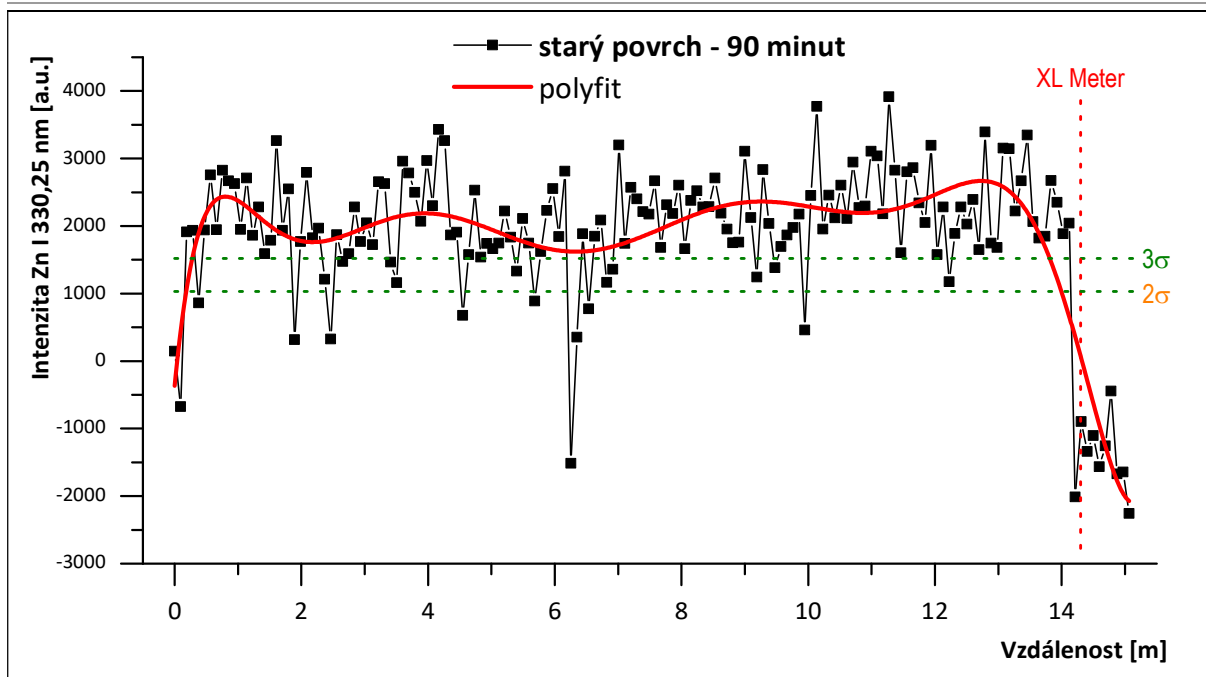
Zkoumání vlivu pozvolné degradace brzdné stopy na výsledky její dokumentace pomocí rLIBS bylo realizováno pomocí sady měření s časovým odstupem 30 minut. Rozdílnost naměřených dat při jednotlivých časově odstupňovaných dokumentacích brzdné stopy pravého předního kola vozidla Škoda Octavia II po měření č. 4 je patrná z **obr. 105** až **obr. 108**.



Obr. 105: Dokumentace brzdné stopy vozidla Škoda Octavia II při měření č. 4, 60 minut po vzniku ¹⁵⁴

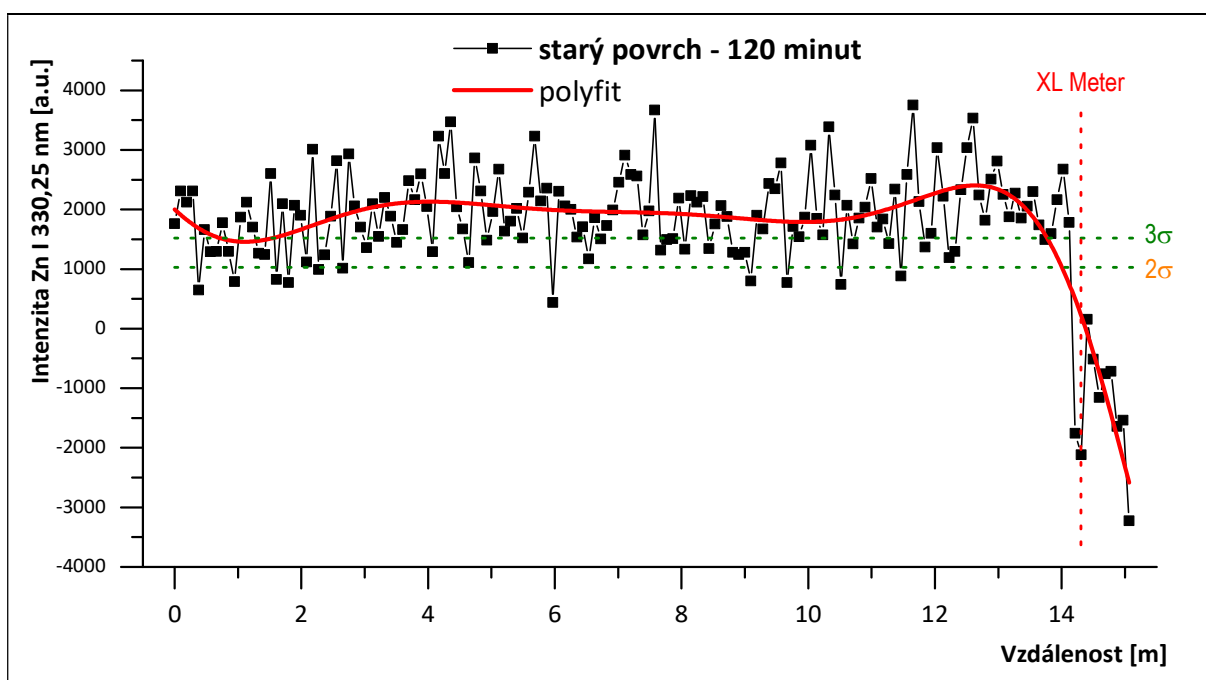
Porovnáním absolutního počtu bodů v bezprostřední blízkosti a nad detekčním limitem 3σ s množstvím zaznamenaným po 30 minutách je zřejmý poměrně významný nárůst. Tento nárůst lze vysvětlit jak přesnějším naváděním měřicího přístroje rLIBS po trajektorii brzdné stopy, tak minimální pozvolnou degradací stopy. Výskyt bodů nad detekčními limity a výrazný pokles hodnot umožňuje jednoznačně odlišit oblast brzdné stopy pneumatiky.

¹⁵⁴ archiv autora



Obr. 106: Dokumentace brzdné stopy vozidla Škoda Octavia II při měření č. 4, 90 minut po vzniku ¹⁵⁵

Porovnáním naměřených hodnot s předešlým **obr. 105** je zřejmý minimální pokles jak absolutních naměřených hodnot, tak četnosti výskytu bodů nad detekčním limitem 3σ . Identifikace brzdné stopy je i v tomto případě jednoznačná.



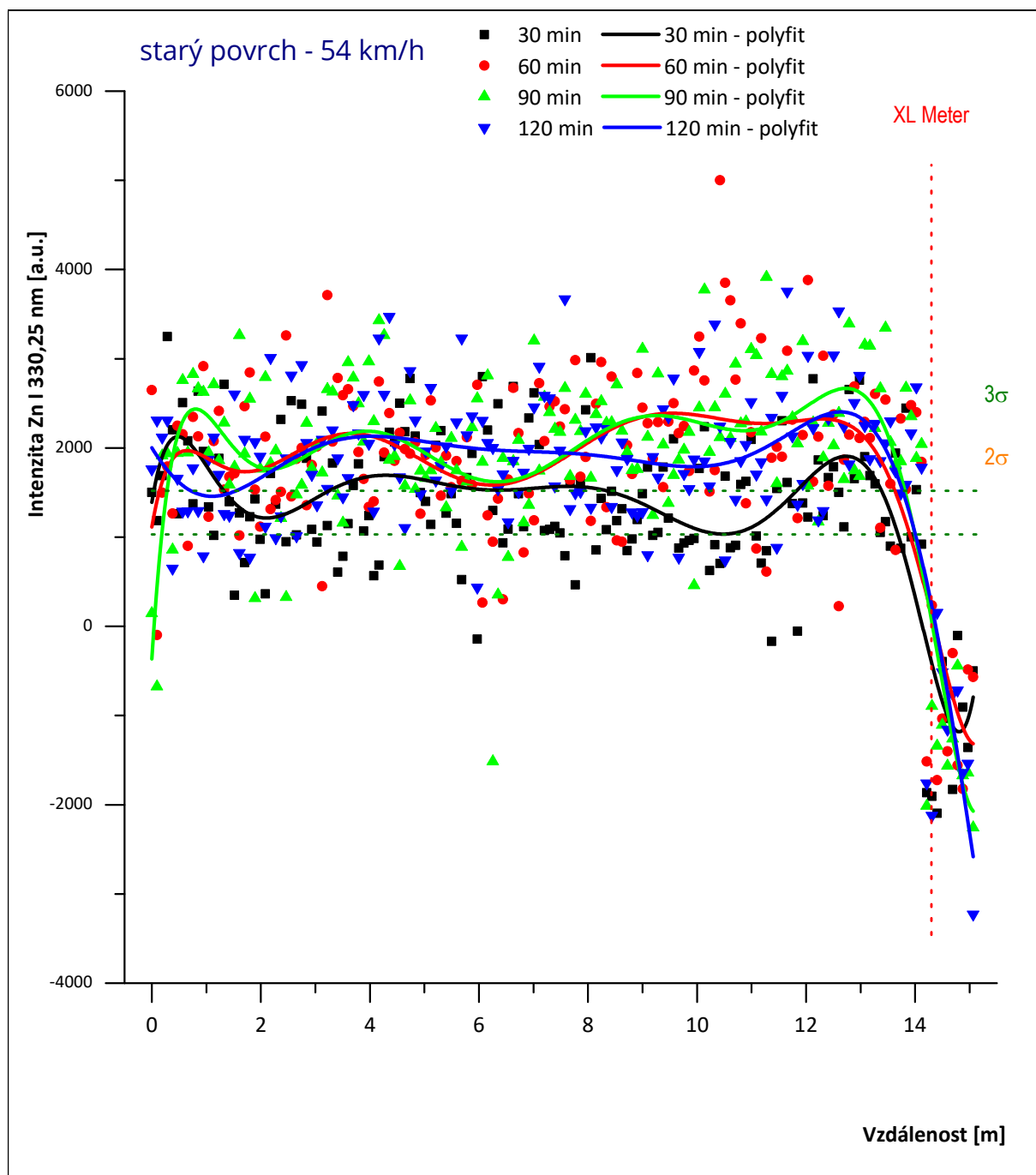
Obr. 107: Dokumentace brzdné stopy vozidla Škoda Octavia II při měření č. 4, 120 minut po vzniku ¹⁵⁶

¹⁵⁵ archiv autora

¹⁵⁶ archiv autora

Porovnáním naměřených hodnot s předešlým **obr. 106** je zřejmý pokles absolutních naměřených hodnot, lze tedy konstatovat, že došlo k částečné degradaci stopy. Jednoznačná identifikace stopy je i přes proběhlou degradaci možná.

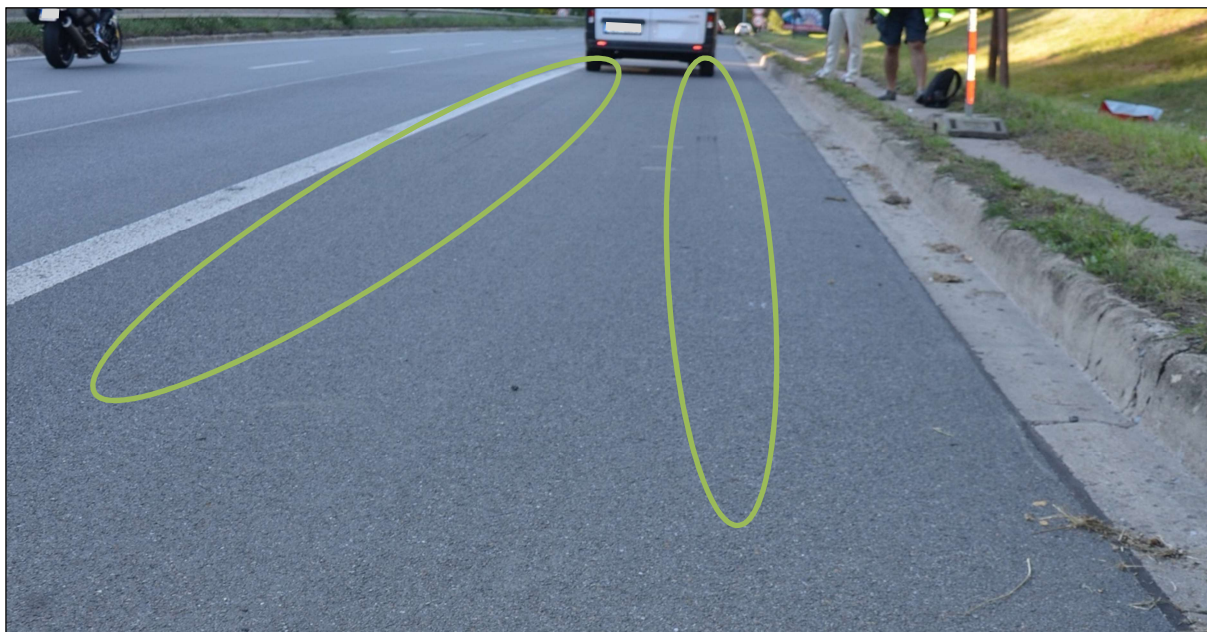
Porovnání naměřených dat všech provedených měření brzdné stopy pravého předního kola vozidla Škoda Octavia při měření č. 4 je vyobrazeno na **obr. 108**.



Obr. 108: Dokumentace brzdné stopy vozidla Škoda Octavia II 30, 60, 90 a 120 minut po vzniku ¹⁵⁷

¹⁵⁷ archiv autora

Množství naměřených bodů nad detekčním limitem 3σ i po 120 minutách od vytvoření brzdné stopy, odpovídá velmi mírné degradaci stopy z pohledu detekce pomocí rLIBS. V porovnání s možností fotografické dokumentace, viz **obr. 109**, kdy po 120 minutách nebyla brzdná stopa prakticky dokumentovatelná, by bylo využití přístroje rLIBS jednoznačně lepší variantou dokumentace stopy.



Obr. 109: Fotograficky zadokumentovaná oblast brzdné stopy po měření č. 4 po 120 minutách ¹⁵⁸

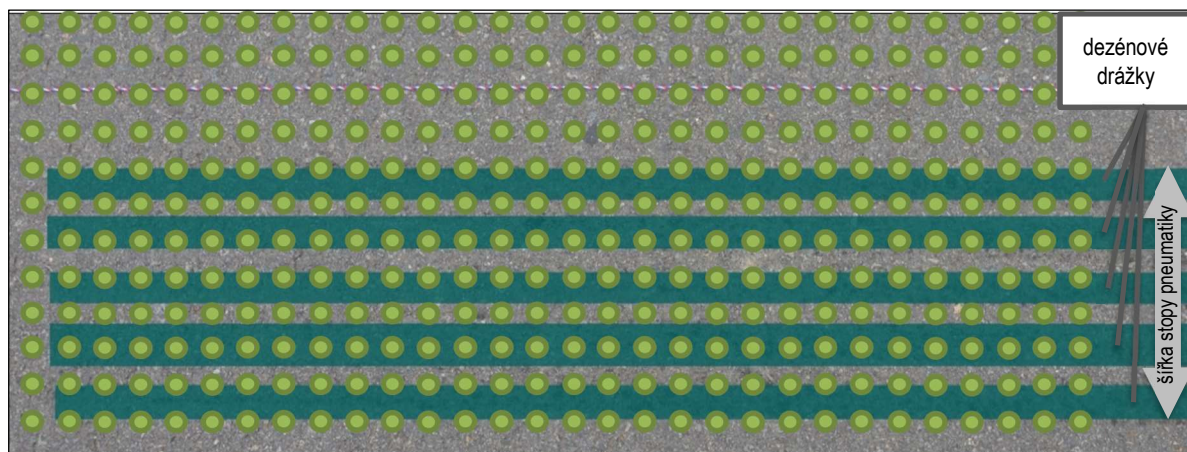
7.5 SHRUTÍ DOSAŽENÝCH VÝSLEDKŮ A OČEKÁVANÝ DALŠÍ VÝVOJ

Pomocí provedených měření byl potvrzen a rozvinut potenciál využití detekce částic pneumatiky, tedy brzdné stopy, na povrchu vozovky pomocí metody LIBS. Pro reálné využití na místech dopravních nehod je však zapotřebí provést několik modifikací, především v oblasti hardwaru měřicího zařízení.

Užitá vývojová varianta přístroje rLIBS byla naváděna ručně s cílem co nejpřesněji kopírovat trajektorii brzdné stopy – tato skutečnost z pohledu detekce znamená několik negativních vlivů. Z hlediska dokumentované plochy se jedná o rozložení bodů na čáře/křivce, která nemusí kopírovat či protínat detekovanou brzdnou stopu – tento nedostatek je však možné kompenzovat rozšířením „záběru“ měřicího zařízení, tak aby detekovaná oblast svým tvarem neodpovídala čáře, ale spíše pruhu či pásu jednotlivých bodů. Dalším problémem je nehomogenní rozložení měřicích bodů, což je zásadní pro možnost vykreslení jakýchkoliv závislostí vzhledem k dráze – tento nedostatek lze vyřešit několika způsoby, například zajištěním konstantní rychlosti pohybu měřicího přístroje či doplněním o generátor signálů pro spuštění měření (rotační snímač apod.). Dalším

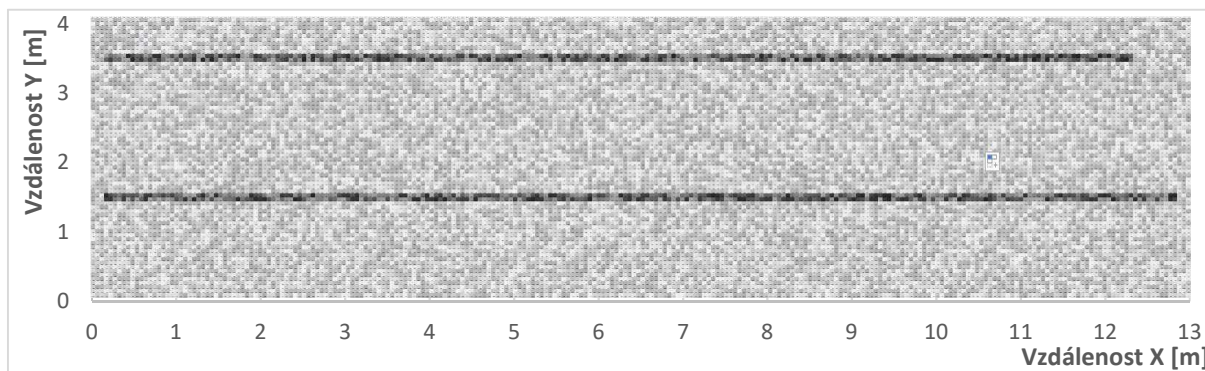
¹⁵⁸ archiv autora

nedostatkem je nedostatečná možnost „kopírování“ zkoumaného povrchu snímací aparaturou, čímž je ovlivněno správné zaostření detekční optiky na měřený povrch a tím může být způsobena ztráta či ovlivnění dat – toto je z technického hlediska řešitelné přidáním kompenzačního a kopírovacího členu do konstrukce zařízení tak, aby byl zkoumaný povrch kopírován s dostatečnou přesností. Zavedení výše popsanych úprav tak umožní vytvoření sítě měřicích bodů, viz **obr. 110**.



Obr. 110: Optimální síť měřicích bodů v oblasti brzdné stopy¹⁵⁹

Vyhodnocením informace zdali, případně kolikanásobně, byl v jednotlivých bodech překročen detekční limit (například barevnou škálou, čím vyšší překročení, tím tmavší barva), lze získat „mapu“ místa dopravní nehody, viz **obr. 111**.



Obr. 111: Vizualizace možného výstupu měření – chemická mapa místa dopravní nehody s barevným odlišením naměřené koncentrace Zn v jednotlivých bodech měření¹⁶⁰

Takto vytvořené výstupy pak odpovídají v současné době používaným plánek místa dopravních nehod, které vytváří policie, a v nich zakresleným brzdným stopám jednotlivých vozidel.

Při provedených měřeních bylo kvalitativně nejlepších výsledků dosaženo na betonovém povrchu z důvodu možnosti minimalizovat výše uvedené negativní vlivy – povrch dostatečně rovný a stopa zřetelná. Získané výstupy v tomto případě jsou kvalitativně nejblíže zamýšlenému cílovému

¹⁵⁹ archiv autora

¹⁶⁰ archiv autora

stavu. Lze předpokládat, že reálné procento jednotlivých bodů, které překročily detekční limity, bylo vyšší. V grafech vyobrazené body byly vytvořeny jako aritmetický průměr 10 po sobě jdoucích měření.

Tendence křivky proložené naměřenými daty, nejen v případě měření na betonovém povrchu, přibližně odpovídá průběhu zaznamenaného zpomalení vozidla, lze tedy předpokládat přímá úměra mezi dokumentovanou intenzitou a zpomalením vozidla. Pro stanovení možného přepočtového koeficientu je však nutné provést další série měření.

Vliv degradace stopy na získaná data byl v rámci možností zkoumán pomocí časově odstupňovaných měření. Na základě vyhodnocení a porovnání lze konstatovat, že vliv degradace na možnost dokumentace a následné identifikace brzdné stopy je minimální.

Metoda detekce brzdných stop pneumatik/jejich částic není závislá na světelných podmínkách na rozdíl od fotodokumentace. Z podstaty věci je však metoda nepoužitelná za deště, tak jako ostatní metody, kvůli odplavení částic pneumatik.

Při dostatečně vysoké rychlosti záznamu dat (předpoklad je několik desítek Hz) v kombinaci s dalšími modifikacemi přístroje by se mělo jednat o poměrně rychlou metodu, například při rychlosti záznamu 100 Hz a síti bodů 1,5 x 1,5 cm je časová náročnost pro zadokumentování prostoru 1 m² přibližně 45 sekund. Pro plochu 15 m jízdního pruhu šíře 3,5 m (oblast brzdné dráhy z rychlosti cca 50 km/h) je doba nutná pro zadokumentování přibližně 40 minut bez ohledu na tvar komunikace či jiné vlivy, které v současnosti příslušníkům policie ztěžují dokumentaci.

Z hlediska finančních nákladů lze předpokládat, že cena zařízení, které bude schopno v autonomním režimu dokumentovat pracovníkem zadanou oblast místa dopravní nehody se bude pohybovat v řádu milionů Kč, což je cenová hladina odpovídající profesionálním termokamerám, případně 3D skenerům.

8 ZÁVĚR

V rámci této dizertační práce byly popsány možnosti identifikace relevantních stop pneumatik na místě dopravní nehody na základě jejich fyzikálních vlastností s využitím moderních metod a zařízení, tj. poznatků na nejvyšší známé úrovni poznání. Detekce nezřetelných stop na místě dopravní nehody je velmi aktuální otázkou, protože stávající metody dokumentace stop na místě dopravní nehody využívané policií neodpovídají vývoji asistenčních systémů vozidel ani dokumentační techniky. Pro soudně inženýrskou analýzu dopravních nehod je však nutné mít co možná nejpřesnější vstupní hodnoty.

Cílem této dizertační práce bylo nalezení metody detekce opticky nezřetelných stop pneumatik na vozovce, která bude co nejméně ovlivnitelná dokumentující osobou a zároveň bude dostatečně rychlá. Za tímto účelem byly stanoveny dílčí cíle v podobě prověření potenciálu využitelnosti termokamery a LIBS.

8.1 VYUŽITELNOST TERMOKAMER PRO DETEKCI NEZŘETELNÝCH STOP

Pomocí série provedených měření bylo potvrzeno využití termokamery za omezených atmosférických a časových podmínek – suchá vozovka, časový limit v řádu desítek minut od vzniku stopy. Při splnění těchto podmínek je možné dosáhnout pro zvýraznění či detekci opticky nezřetelných brzdných stop vozidel.

Tepelné ovlivnění povrchu vozovky bylo možné detekovat pouze po dobu několika sekund po brzdění vozidla. V praxi tento způsob pro identifikaci a stanovení délky brzdné dráhy vozidla není využitelný. Z hlediska detekovatelného teplotního ovlivnění povrchu vozovky je reálně využitelná možnost identifikace konečné polohy vozidla po jeho odstavení za podmínky, že vozidlo stálo v konečné poloze alespoň 5 minut a následně bylo přemístěno. Za stejných předpokladů bylo možné identifikovat i tepelné otisky pneumatik předmětného vozidla i po cca 30 minutách po přemístění vozidla.

Zvýraznění opticky nezřetelných brzdných stop vozidla s použitím termokamery je reálně proveditelné na základě různé emisivity povrchu vozovky a povrchu vozovky s brzdnou stopou. Při možnosti změny emisivity dokumentovaného objektu, a to jak přímo na místě, tak případně při následném zpracování dat, je možné i při jednotné teplotě odlišit oblasti s různou emisivitou.

Zásadním prvkem, který má vliv na kvalitu získaných dat pomocí termokamery, je správné zaostření dokumentovaného objektu či prostoru, z toho plyne snadná subjektivní ovlivnitelnost. Využití termokamery tak neodpovídá požadavkům stanoveným na detekční metodu.

8.2 VYUŽITELNOST LIBS PRO DETEKCI NEZŘETELNÝCH STOP

V oblasti využitelnosti spektroskopie pro detekci nezřetelných stop tato práce navazuje na práci Ing. Davida Procházky, Ph.D. V rámci již publikovaných výsledků měření, ve dvou impaktovaných článcích, byl popsán potenciál a základní možnost detekovat částice pneumatiky na vozovce – tato tvrzení byla v rámci této dizertační práce podložena sérií měření s větší variabilitou povrchů, vozidel, pneumatik i výchozích rychlostí.

Na základě výsledků lze konstatovat, že užitá metodika sběru dat pomocí přístroje je silně subjektivně ovlivnitelná – rozložení a rozmístění bodů, správné zaostření atd., toto bylo způsobeno dosažením technických a technologických limitů zařízení rLIBS v dané vývojové variantě. Jednotlivé vlivy byly identifikovány a z technického hlediska je možné je eliminovat či zcela odstranit dalšími modifikacemi a dovybavením zařízení. K datu odevzdání této práce bylo za účelem těchto modifikací podáno několik grantových žádostí, které byly vždy recenzenty kladně hodnoceny a v případě výzvy MPO TRIO také finančně podpořeny.

Z provedených měření bylo nejlepších výsledků dosaženo na betonovém povrchu, tendence křivky proložené naměřenými daty prakticky kopíruje křivku průběhu zpomalení v závislosti na dráze. Pro stanovení možného přepočtového koeficientu mezi naměřenou intenzitou Zn a zpomalením je však nutné provést další série měření.

Vliv degradace stopy, jak pozvolné, tak zvýšené, na získaná data, byl v rámci možností zkoumán pomocí časově odstupňovaných měření až do doby 120 minut po vzniku stopy. Na základě vyhodnocení a porovnání lze konstatovat, že vliv degradace na možnost dokumentace a následné identifikace brzdné stopy je minimální.

Využití LIBS není závislé na světelných podmínkách na rozdíl od, v současné době používané, fotodokumentace. Shodně jako v případě termokamery a dalších metod, také LIBS není využitelná při dešti či mokré vozovce.

Lze konstatovat že, při odstranění popsanych technicky řešitelných nedostatků, je možné metodu použití LIBS pro detekci opticky nezřetelných stop pneumatik považovat za metodu minimálně ovlivnitelnou dokumentující osobou a současně dostatečně rychlou – tedy zcela odpovídající požadavkům stanoveným v cílech této práce.

9 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- BRADA, M.: Polohovací jednotka pro laserovou spektroskopii. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2012. 74 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Daniel Koutný, Ph.D.
- BRADÁČ, A.: Soudní inženýrství. Brno: CERM, 1999. ISBN 80-720-4133-9
- BURG, H., MOSER, A.: Handbuch Verkehrsunfallrekonstruktion: Unfallaufnahme, Fahrdynamik, Simulation. 2., aktualisierte Aufl. Wiesbaden: Vieweg+Teubner, 2009. s.34
- ČERMÍN, S. a kol.: Kriminalistika dopravní nehody. Praha: SPN, 1968
- DIVÍŠ, P.; SOLNÝ, T.; PTÁČEK, P.; ADAMEC, V.; BILÍK, M.; BRADÁČ, A.; SCHÜLLEROVÁ, B. Analysis of tire composition for further detection of tire marks on the road. Czech Chemical Society Symposium Series, 2015, roč. 13, č. 2, s. 137-138. ISSN: 2336- 7210
- DOLEŽEL, J., NOVÁK Č., VOLF Z.: Kriminalistické minimum, 1. vyd., Praha : Ministerstvo vnitra ČR, 1998 - 31 s
- DVOŘÁČEK, T. Metodika ohledání dopravní nehody policií. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Ústav soudního inženýrství, 2013. 83 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Bc. Marek Semela, Ph.D.
- SARKISSIAN, G., KEEGAN, J., DU PASQUIER, E., DEPRIESTER, J.-P., ROUSSELOT, P.: The Analysis of; Tires and Tire Traces using FTIR and Py-GC/MS, Canadian Society of Forensic Science Journal, (2004) 37:1, 19-37, DOI: 10.1080/00085030.2004.10757566
- GUEISSAZ, L., MASSONNET, G.: Chemical Analysis of TireTraces in Traffic Accidents Investigation. J Forensic Sci Med 2015;1:99-108
- GUEISSAZ, L., MASSONNET, G.: Tire traces - discrimination and classification of pyrolysis-GC/MS profiles. Forensic science international [online]. 2013, vol. 230, no. 1-3, pp. 46-57
- CHMELÍK J. a kol.: Dopravní nehody. Plzeň: Nakladatelství Aleš Čeněk, s.r.o., 2009. 540 s., ISBN 978-80-7380-211-0
- CHMELÍK J.: Vyšetřování silničních dopravních nehod str. 52
- JANÍČEK, P.: Systémová metodologie: Brána do řešení problémů. Vyd. 1. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2014, 1 sv. ISBN 978-80-7204-887-8. str. 123 A
- JANÍČEK, P., MAREK, J.: Expertní inženýrství v systémovém pojetí. Praha: Grada, 2013. Expert (Grada). ISBN 978-80-247-4127-7, str. 75
- KEJÍKOVÁ, B.: Vliv hloubky dezénové drážky na dosažitelné zpomalení vozidla. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Ústav soudního inženýrství, 2016. 60 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Albert Bradáč, Ph.D.
- Kolektiv autorů: Gumárenská technologie, učební texty Barum Continental spol. s r. o., 2008
- KONEČNÝ, J.: Šetření a dokumentace silničních dopravních nehod, 1. vyd. Vyšší policejní škola MV v Brně, 2011, 141 s. MV-50082-1/VO-2011
- KOS, J.: 2010: Historie ABS [online]. [cit. 2016-12-20].
www.automotospecial.cz/technika/bosch/historie-abs-2010
- KRAUS P.: Generační vývoj systému ABS a jeho vliv na indikaci brzdné stopy na vozovce, ExFOS 2015
- LACHOWICZ, T., ZIĘBA-PALUS, J., KOŚCIELNIAK, P.,: Chromatographic Analysis of Tire Rubber Samples as the Basis of Their Differentiation and Classification for Forensic Purposes. Analytical

Letters [online]. Taylor, 2013, 46(15), 2332-2344 [cit. 2017-02-03]. DOI: 10.1080/00032719.2013.800536. ISSN 0003-2719

LACHOWICZ, T., ZIĘBA-PALUS, J., KOŚCIELNIAK, P.,: Pyrolysis Gas Chromatography - Mass Spectrometry for the Characterization of Tire Marks for Forensic Analysis. Analytical Letters [online]. Taylor, 2014 [cit. 2017-02-03]. DOI: 10.1080/00032719.2013.865200. ISSN 0003-2719

MALÁČ J.: Gumárenská technologie – 2. Kaučuky
<http://www.home.karneval.cz/0323339201/text/kaucuky.pdf>
manuál PC crash 10.1

MUSIL, J., KONRÁD, Z., SUCHÁNEK, J.: Kriminalistika. 2., Praha: C. H. Beck, 2004, s. 494

Nariadenie č. 25/2010 prezidenta Policajného zboru Slovenskej republiky o postupe pri vyhotovovaní, spracovávaní a uchovávaní digitálnych obrazových záznamov na účely trestného konania. Čl. 17

NOVOTNÝ, J.: Dálkově řízená laserová spektroskopie (LIBS). Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2012. 97 s. Vedoucí doc. Ing. Jozef Kaiser, Ph.D.

Policie ČR: Informace o nehodovosti na pozemních komunikacích v ČR v roce 2017,
<http://www.policie.cz/clanek/statistika-nehodovosti-900835.aspx?q=Y2hudW09Mg%3d%3d> [cit. 11.01.2018]

PETRIK, M.: Řídicí systém pro dálkovou laserovou spektroskopii. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav radioelektroniky, 2013. 73 s. Vedoucí práce byl Ing. Michal Kubíček, Ph.D.

PORADA, V.: Silniční dopravní nehoda v teorii a praxi. Praha: Linde, 2000, 378 s. ISBN 80-720-1212-6

PROHAZKA, D.: Detekce brzdných stop pomocí spektrometrie laserem indukovaného plazmatu (LIBS) a spektrometrie laserem indukované fluorescence (LIBS + LIFS). Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2014. 87 s. Vedoucí dizertační práce prof. Ing. Jozef Kaiser, Ph.D.

PROHAZKA, D., BILÍK, M., a kol.: Detection of Visually Unrecognizable Braking Tracks Using Laser-Induced Breakdown Spectroscopy (LIBS). Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy

PROHAZKA, D.; BILÍK, M.; PROHAZKOVÁ, P.; BRADA, M.; KLUS, J.; POŘÍZKA, P.; NOVOTNÝ, J.; NOVOTNÝ, K.; TICOVÁ, B.; BRADÁČ, A.; SEMELA, M.; KAISER, J. Detection of visually unrecognizable braking tracks using Laser-Induced Breakdown Spectroscopy, a feasibility study. Spectrochimica Acta Part B, 2016, č. 118, s. 90-97. ISSN: 0584-8547

RÁBEK, V.: Optické metody detekce nezřetelných stop na vozovce při znalecké analýze silničních nehod. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Ústav soudního inženýrství, 2003. Vedoucí dizertační práce prof. Ing. Albert Bradáč, Dr.Sc.

RAPANT, P.: Družicové polohové systémy. VŠB-TU Ostrava, 2002. 200 str. ISBN 80-248-0124-8. [online]. Dostupné z: <http://docplayer.cz/10052548-Druzicove-polohove-systemy.html> [cit. 2018-05-05]

Rentgenové spektrometry ED-XRF <https://www.bas.cz/rentgenove-spektrometry/xrf-rentgenove-spektrometry.php>

ŘÍHA, J.: Moderní přístrojová technika. [online] Praha 2014 [cit. 13.12.2015] Dostupné z: <http://spszem.cz/>

SAJDL, J.: ABS (Anti-lock Braking System). Autolexicon.net [online]. [cit. 2016-12-20].

SAJDL, J.: Konstrukce pneumatiky. Autolexicon.net [online]. [cit. 2017-11-28]

STÁŇA, I.; TOKAŘ, S.; BUCSUHÁZY, K.; BILÍK, M.: Comparison of Utilization of Conventional and Advanced Methods for Traffic Accidents Scene Documentation in the Czech Republic. *Procedia Engineering*, 2017, roč. 187, č. C, s. 471-476. ISSN: 1877-7058

STÁŇA, I.; TOKAŘ, S.; BUCSUHÁZY, K.; BILÍK, M.: Comparison of Utilization of Conventional and Advanced Methods for Traffic Accidents Scene Documentation in the Czech Republic. *Procedia Engineering*, 2017, roč. 187, č. C, s. 471-476. ISSN: 1877-7058

ŠACHL, J.: Zvláštnosti stop na místech dopravních nehod. *Soudní inženýrství* č.6, 2002

TOKAŘ, S., STÁŇA, I., BILÍK, M.: Comparison possibilities of Mesurment of Traffic Accident Place. In: *Proceedings of Expert Forensic Science Brno 2016*, 146-158

VAŠÍČEK, E.: Gumárenské směsi <http://slideplayer.cz/slide/3762754/>

VLK, F.: *Automobilová elektronika 1: asistenční a informační systémy*. 1. vyd. Brno: Prof. Ing. František Vlk, DrSc, 2006. ISBN 80-239-6462-3

VLK, F.: *Dynamika motorových vozidel* str. 121

VLK, F.: *Elektronické systémy motorových vozidel*. 1. vyd. Brno: František Vlk, 2002, vii, 299-592 s. ISBN 80-238-7282

VLK, F.: *Podvozky motorových vozidel*. 2. vyd. Brno: František Vlk, 2003. ISBN 80-239-0026-9

[www stránky společnosti Robert Bosch, GmbH, \[Online\],](#)

www.aeryon.com/aeryon-skyranger

www.creaform3d.com/en/metrology-solutions/handheld-portable-3d-scanner-goscan-3d

www.dji.com

www.faro.com/en-gb/products/construction-bim-cim/faro-focus/

www.fluke.com/fluke/czcs/termokamera/Fluke-Ti400.htm

www.fotoradce.cz/recenze-canon-eos-450d

www.geoserver.cz/gnss-gps-gis-software/geodeticke-gnss

www.merici-pristroje.cz/faro-focus3d-x130-laser-scanner/

www.racelogic.com

www.youtube.com/watch?v=d2CmxqcMQcE

www.wikiskripta.eu/w/Soubor:Normalni_rozdeleni.png

Závazný pokyn policejního prezidenta č. 100/2001 ke kriminalistickotechnické činnosti Policie ČR, Čl. 33

Archiv ÚSI VUT v BRNĚ

Archiv autora

Seznam obrázků

Obr. 1: Na snímku vlevo je vyobrazena oblast předstřetového pohybu vozidla bezprostředně po dokončení ohledání místa dopravní nehody; vpravo je vyobrazena shodná oblast po sekundárním ohledání (po oschnutí vozovky), kdy byl zjištěn počátek brzdné stopy vozidla o cca 25 m dále.....	16
Obr. 2: Stopy na exteriéru a interiéru poškozeného vozidla po dopravní nehodě	18
Obr. 3: Stopy kapalin na místě dopravní nehody.....	19
Obr. 4: Stopy vozidel na pevných objektech.....	19
Obr. 5: Stopy na tělech účastníků DN, vlevo – stopy přejetí vozidlem; vpravo – stopy bezpečnostních pásů ..	20
Obr. 6: Jízdní stopy vozidla otištěné do původně měkkého podkladu	21
Obr. 7: Detail části brzdné stopy s rozeznatelným dezénem pneumatiky, přechod brzdné a blokovací stopy	22
Obr. 8: Blokovací stopy.....	22
Obr. 9: Smykové stopy, vlevo – volně odvalujícího se kola; vpravo – brzděného kola; dole – akcelerujícího kola	23
Obr. 10: Smykové stopy	23
Obr. 11: Akcelerační stopy výkonného sportovního vozidla	24
Obr. 12: Dřecí a rycí stopy.....	24
Obr. 13: Stopa pneumatiky vozidla s ABS	25
Obr. 14: Pohledy na vozovku, na které bylo provedeno zabrzdění z rychlosti 70 km/h (vlevo starý povrch, vpravo nový povrch).....	25
Obr. 15: Průběh brzdění	26
Obr. 16: Síly působící na vozidlo při brzdění	27
Obr. 17: Kammova kružnice	28
Obr. 18: Historicky první ABS od firmy Bosch (model 2S z roku 1978).....	30
Obr. 19: Integrovaná řídicí jednotka ABS 2S do hydraulické jednotky	30
Obr. 20: Vlevo – ABS 2E s řídicí jednotku integrovanou do bloku s hydraulickou jednotkou; vpravo – ABS 5.0	31
Obr. 21: Vlevo – ABS 5.3; vpravo – ABS 8.0	32
Obr. 22: Vývoj a miniaturizace systému ABS v letech 1978 až 2003.....	32
Obr. 23: Průběh brzdění vozidla Škoda Octavia I. generace (1999) z rychlosti 100 km/h.....	33
Obr. 24: Průběh brzdění vozidla Škoda Fabia III. generace (2014) z rychlosti 100 km/h	34
Obr. 25: Rozvoj funkcí systému ESC vozidel Škoda.....	34
Obr. 26: Příklady použití ortogonální metody	36
Obr. 27: Příklady použití průsečkové metody	36
Obr. 28: Příklady použití trojúhelníkové metody	37
Obr. 29: Použití totální geodetické stanice na místě dopravní nehody ⁵³	38
Obr. 30: GNSS přijímač Trimble X91 s kontrolerem Trimble R8.....	38
Obr. 31: Částice pneumatiky na povrchu vozovky	40
Obr. 32: Digitální zrcadlovka Canon EOS 450D se základním objektivem	40

Obr. 33: Porovnání místa dopravní nehody zaměřeného pomocí totální geodetické stanice (síťový model) s provedenou rektifikací snímků (včetně vyznačených brzdných a smykových stop)	41
Obr. 34: Laserový 3D skener FARO Focus3D-X130; zpracování dat v softwaru Faro Reality	42
Obr. 35: Použití 3D skenu místa dopravní nehody v simulačním programu PC Crash	43
Obr. 36: Ruční optický skener GO!SCAN 3D	44
Obr. 37: Dron Aeryon SkyRanger a ukázka možnosti dokumentace místa dopravní nehody	44
Obr. 38: Dron DJI Spark s automatickou stabilizací i vyhýbáním se překážkám	45
Obr. 39: Termografické snímky brzdné dráhy vozidla s časovým odstupem 30 minut z měření provedeného Ing. Vlastimilem Rábkem, Ph.D.	46
Obr. 40: Termografický snímek tepelného otisku vozidla a ležící osoby.....	47
Obr. 41: Ukázka částic pneumatiky na daktyloskopické pásce	48
Obr. 42: Porovnání zpomalení vozidla a intenzity spektrální čáry	50
Obr. 43: Pneumatika patentovaná R. W. Thomsonem v roce 1845.....	51
Obr. 44: Konstrukce pneumatiky: 1 – korunní kordová vrstva; 2 – běhoun (vpravo nahoře); 3 – radiální kordová vrstva; 4 – bočnice (vpravo dole); 5 – vnitřní gumová vrstva; 6 – patka; 7 – patní lano.....	51
Obr. 45: Řez pneumatikou osobního vozidla.....	52
Obr. 46: Ukázka získaného XRF spektra běhounu pneumatiky.....	56
Obr. 47: Stopy pneumatik osobního vozidla a motocyklu překryté únikem provozních kapalin a posypem sorbentu	57
Obr. 48: Fotodokumentace stop na identickém místě dopravní nehody v noci a druhého dne ráno	58
Obr. 49: Schéma průběhu brzdných zkoušek	60
Obr. 50: Ukázka chemické mapy výskytu olova ve zkoumaném vzorku vytvořená pomocí LIBS ⁹⁶	61
Obr. 51: Mobilní zařízení rLIBS – vlevo s teleskopem, uprostřed – detail modulu pro detekci brzdných stop na vozovce, vpravo – Laserový pulz.....	63
Obr. 52: XL Meter nainstalovaný na předním skle testovaného vozila	64
Obr. 53: Telemetrie Racelogic.....	65
Obr. 54: Termokamera Fluke Ti 400	65
Obr. 55: Zařízení pro označení počátku brzdění na vozovce připevněné na testovacím vozidle	66
Obr. 56: Průběh měření provedených v roce 2014.....	68
Obr. 57: Zvýraznění vychladlé blokovací stopy vozidla	69
Obr. 58: Průběh dosaženého brzdného zpomalení při měřeních 1, 2, 5, 8, 9, 11 a 12	69
Obr. 59: Měření č. 1 – VW Tiguan, výchozí rychlost 32 km/h, brzdná dráha 5,85 m	70
Obr. 60: Měření č. 2 – VW Tiguan, výchozí rychlost 54 km/h, brzdná dráha 15,2 m	70
Obr. 61: Měření č. 9 Škoda Octavia I RS, výchozí rychlost 30 km/h, brzdná dráha 5,1 m	71
Obr. 62: Měření č. 11 – VW Tiguan, výchozí rychlost 67 km/h, brzdná dráha 20,4 m.....	71
Obr. 63: Měření č. 12 – VW Tiguan, výchozí rychlost 48 km/h, brzdná dráha 10,9 m.....	72
Obr. 64: Měření č. 8 – Ford Focus, výchozí rychlost 83 km/h, brzdná dráha 29,5 m	72
Obr. 65: Měření č. 5 – VW Golf Plus, výchozí rychlost 74 km/h, brzdná dráha 25,5 m	73
Obr. 66: Průběh dosaženého brzdného zpomalení při měření č. 10	73
Obr. 67: Měření č. 10 Škoda Octavia I RS, výchozí rychlost 55 km/h, brzdná dráha 15,1 m	74

Obr. 68: Měření č. 10 Škoda Octavia I RS – detail konečné polohy	74
Obr. 69: Tepelný otisk pneumatik vozidla VW Tiguan 10 minut po odstavení vozidla	75
Obr. 70: Tepelný otisk levé přední pneumatiky vozidla Tiguan 30 minut po odstavení vozidla	75
Obr. 71: Průběh měření provedených v roce 2016	77
Obr. 72: Vizualizace rozmístění měřicích bodů vzhledem k brzdě stopě	78
Obr. 73: Vizualizace rozmístění měřicích bodů vzhledem k povrchu vozovky	79
Obr. 74: Hustota normálního rozdělení se střední hodnotou μ a směrodatnou odchylkou σ	79
Obr. 75: Ukázka naměřených hodnot brzdě stopy na asfaltovém povrchu.....	80
Obr. 76: Měření č. 1 – Škoda Octavia II, výchozí rychlost 54 km/h, brzdá dráha 14,51 m; vlevo – pohled ve směru brzdění; vpravo – pohled proti směru brzdění.....	81
Obr. 77: Detekce brzdě stopy na betonovém povrchu s využitím přístroje rLIBS.....	81
Obr. 78: Měření č. 1 – porovnání dat z měřicích přístrojů rLIBS a XL Meter	82
Obr. 79: Průběh dosaženého brzdě zpomalení při měření na méně používaném povrchu	83
Obr. 80: Průběh dosaženého brzdě zpomalení při měření č. 2	83
Obr. 81: Fotograficky zadokumentované brzdě stopy po měření č. 2; vlevo – pohled proti směru jejich vzniku; vpravo – pohled po směru jejich vzniku	84
Obr. 82: Dokumentace brzdě stopy pravého předního kola vozidla Škoda Octavia II při měření č. 2	84
Obr. 83: Dokumentace brzdě stopy vozidla Škoda Octavia II při měření č. 2, 60 min. po jejím vzniku	86
Obr. 84: Dokumentace brzdě stopy vozidla Škoda Octavia II při měření č. 2, 90 min. po jejím vzniku	86
Obr. 85: Dokumentace brzdě stopy vozidla Škoda Octavia II při měření č. 2, 120 min. po vzniku	87
Obr. 86: Dokumentace brzdě stopy vozidla Škoda Octavia II 30, 60, 90 a 120 minut po jejím vzniku	88
Obr. 87: Fotograficky zadokumentované brzdě stopy po měření č. 2 po 120 minutách	89
Obr. 88: Průběh dosaženého brzdě zpomalení při měření č. 8	89
Obr. 89: Fotograficky zadokumentované brzdě stopy po měření č. 8; vlevo – pohled ve směru jejich vzniku; vpravo – pohled proti směru jejich vzniku	90
Obr. 90: Dokumentace brzdě stopy vozidla Škoda Superb III Combi při měření č. 8	90
Obr. 91: Dokumentace brzdě stopy vozidla Superb III Combi při měření č. 8, 60 min. po vzniku	91
Obr. 92: Dokumentace brzdě stopy vozidla Superb III Combi při měření č. 8, 90 min. po vzniku	92
Obr. 93: Dokumentace brzdě stopy vozidla Škoda Superb III Combi 30, 60 a 90 min. po vzniku	93
Obr. 94: Fotograficky zadokumentovaná oblast brzdě stopy po měření č. 8 po 90 minutách	93
Obr. 95: Průběh dosaženého brzdě zpomalení při měření č. 5 na novém povrchu	94
Obr. 96: Fotograficky zadokumentované brzdě stopy po měření č. 5; vlevo – pohled po směru jejich vzniku; vpravo – pohled proti směru jejich vzniku	94
Obr. 97: Dokumentace brzdě stopy pravého předního kola vozidla Škoda Octavia II při měření č. 5	95
Obr. 98: Dokumentace brzdě stopy vozidla Škoda Octavia II při měření č. 5, 60 minut po vzniku	96
Obr. 99: Dokumentace brzdě stopy vozidla Škoda Octavia II při měření č. 5, 90 minut po vzniku	96
Obr. 100: Dokumentace brzdě stopy vozidla Škoda Octavia II při měření č. 5, 120 minut po vzniku.....	97
Obr. 101: Dokumentace brzdě stopy vozidla Škoda Octavia II 30, 60, 90 a 120 min. po jejím vzniku	98
Obr. 102: Průběh dosaženého brzdě zpomalení při měření č. 4 na starém povrchu	99

Obr. 103: Fotograficky zadokumentované brzdné stopy po měření č. 4; vlevo – pohled po směru jejich vzniku; vpravo – pohled proti směru jejich vzniku	100
Obr. 104: Dokumentace brzdné stopy pravého předního kola vozidla Škoda Octavia II při měření č. 4.....	100
Obr. 105: Dokumentace brzdné stopy vozidla Škoda Octavia II při měření č. 4, 60 minut po vzniku	101
Obr. 106: Dokumentace brzdné stopy vozidla Škoda Octavia II při měření č. 4, 90 minut po vzniku	102
Obr. 107: Dokumentace brzdné stopy vozidla Škoda Octavia II při měření č. 4, 120 minut po vzniku	102
Obr. 108: Dokumentace brzdné stopy vozidla Škoda Octavia II 30, 60, 90 a 120 minut po vzniku	103
Obr. 109: Fotograficky zadokumentovaná oblast brzdné stopy po měření č. 4 po 120 minutách	104
Obr. 110: Optimální síť měřicích bodů v oblasti brzdné stopy	105
Obr. 111: Vizualizace možného výstupu měření – chemická mapa místa dopravní nehody s barevným odlišením naměřené koncentrace Zn v jednotlivých bodech měření	105

Seznam tabulek

Tab. 1: Receptura směsí pro nákladní pneumatiky	54
Tab. 2: Množství prvků ve vzorku pneumatiky.....	56
Tab. 3: Parametry testovacích vozidel.....	66
Tab. 4: Parametry testovaných povrchů	67